EDIZIONE ITALIANA

DAL TRANSISTOR AL MICROPROCESSORE

corso illustrato a colori sui semiconduttori

G. Bohle
e
E. Hofmeister

GRUPPO EDITORIALE JACKSON

DAL TRANSISTOR AL MICROPROCESSORE

corso illustrato a colori sui semiconduttori

G. Bohle
e
E. Hofmeister

GRUPPO
EDITORIALE
JACKSON
Via Rosellini, 12
20124 Milano

Versione originale tedesca:
G. Bohle - E. Hofmeister
Der Halbleiterbauelement für die Elektronic
della Siemens Aktiengesellschaft

© Copyright per l'Edizione originale Siemens Aktiengesellschaft 1983
© Copyright per l'Edizione Italiana Gruppo Editoriale Jackson - Milano 1983

L'autore ringrazia per il prezioso lavoro svolto nella stesura dell'edizione italiana la signora Francesca Di Fiore e l'ing. Roberto Pancaldi.

Tutti i diritti sono riservati. Stampato in Italia. Nessuna parte di questo libro può essere riprodotta, memorizzata in sistemi di archivio, o trasmessa in qualsiasi forma o mezzo, elettronico, meccanico, fotocopia, registrazione o altri senza la preventiva autorizzazione scritta dell'editore.

Stampato in Italia da:
S.p.A. Alberto Matarelli - Milano - Stabilimento Grafico

PREFAZIONE ALLA EDIZIONE ITALIANA

Ogni qualvolta mi soffermo a valutare la situazione odierna del tecnico radio-TV mi sorge alla mente quella del corridore ciclista quando, testa abbassata e mani ben strette sul manubrio, pedala al centro del plotone senza tanto badare a ciò che gli succede intorno. Piano piano, quasi inavvertitamente, egli viene superato dai suoi avversari, ora da una parte ora dall'altra. Quando rialza la testa per riprendere fiato, si accorge di essere rimasto solo in fondo al gruppo.
Similmente, il riparatore TV concentrato per molte ore al giorno sul suo duro lavoro, quando riesce a darsi qualche attimo di pausa, si accorge che molte altre novità tecniche sono apparse alla ribalta e che egli è rimasto indietro con le sue conoscenze.
Trovare tempo per aggiornarsi non è facile. Quello che c'è a disposizione in una giornata basta appena per guadagnarsi la vita. Oltre a ciò non è sempre facile trovare pubblicazioni che in poco tempo e con poca fatica facciano recuperare il tempo perduto.
Nel campo dei semiconduttori, di tanto in tanto ci si imbatte in qualche componente nuovo di cui si hanno cognizioni parziali o incomplete. Questo libro, nato da una pubblicazione della Siemens Tedesca, ha l'ambizione di aiutare i tecnici TV a colmare questa lacuna.
I suoi punti positivi sono molti: è breve e non stanca. La teoria è ridotta al minimo. Le illustrazioni, quasi tutte a colori, sono molte e aiutano a capire più rapidamente e a meglio ricordare i concetti espressi.
Due indici permettono di reperire con celerità gli argomenti che interessano.
Questo Corso sui semiconduttori è un altro strumento operativo che la J.C.E. mette a disposizione dei tecnici TV attraverso la collana TV SERVICE.

Amadio Gozzi

INDICE

Fondamenti Pagina

Proprietà fisiche ed elettriche dei semiconduttori 8
Semiconduttori drogati 10
Tecniche di drogaggio 12
Coppia PN ed effetto giunzione 14

Componenti discreti

Il raddrizzatore (diodo) 16
Diodi per applicazioni speciali 18
Diodi per microonde 20
Componenti fotosensibili 22
Diodi luminescenti (LED) 24
Il transistor bipolare 26
Il transistor al Silicio in tecnica planare 28
Trasistori di potenza al Silicio 30
Il Tiristor ed i Triac 32
Il transistor ad effetto di campo (FET) 34
Il transistor MOS (MOS-FET) 36

Circuiti integrati

Circuiti a film 38
Circuiti ibridi 40
Circuiti integrati monolitici 42
Circuiti integrati bipolari 44
Circuiti integrati bipolari di tipo analogico 45
Circuiti integrati bipolari di tipo digitale 46
Integrazione a grande scala 48
Tecniche bipolari per l'integrazione a grande scala 50
Teniche MOS per l'integrazione a grande scala 52
P - MOS con gate di Alluminio 54
P - MOS con gate al Silicio 55
P - MOS con transistori a svuotamento ed a riempimento 56
N - MOS con gate di Alluminio 58
N - MOS con gate di Silicio 59
C - MOS (tecnica MOS complementare) 60
Tecnica ESFI 62
SOS (Silicio su zaffiro) 63
Circuiti con accoppiamento di carica (CCD) 64
Microprocessori 66
Microcomputers 68

Glossario alfabetico 70

I SEMICONDUTTORI

Sono i rappresentanti di una nuova era della tecnica.

All'elettronica dei semiconduttori noi dobbiamo una gran quantità di prodotti dalle meravigliose proprietà, ed una loro sempre maggiore diffusione.

Lo sviluppo dei moderni componenti a semiconduttore presuppone profonde conoscenze scientifiche nel campo della fisica dello stato solido.

Le ricerche sui semiconduttori iniziarono circa cento anni fa con la scoperta dell'effetto giunzione. L'impulso più forte è arrivato nell'anno 1948 con la scoperta del transistor.

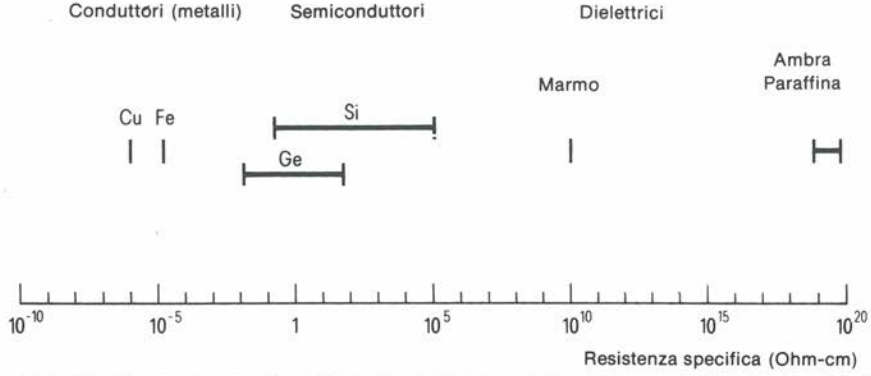
Da questo momento sono apparsi nuovi concetti e nuovi componenti che costituiscono, per chi non è un tecnico dei semiconduttori, una massa alquanto intricata di conoscenze. Il compendio che presentiamo dovrebbe essere una panoramica atta a fornire un'ispirazione riguardo alla tecnologia, la costruzione, il funzionamento, le proprietà elettriche e le applicazioni dei più importanti componenti a semiconduttore finora noti (a tutto il Gennaio 1976).

PROPRIETA' FISICHE ED ELETTRICHE DEI SEMICONDUTTORI

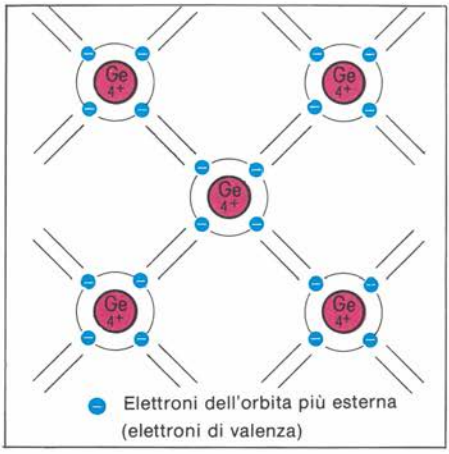
All'opposto dei conduttori e dei dielettrici, la conducibilità dei semiconduttori dipende fortemente da:

- Temperatura
- Illuminazione
- Drogaggio con impurità

Suddivisione dei materiali a seconda della conduttività elettrica

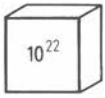


Alla temperatura ambiente la conducibilità elettrica del semiconduttore sta all'incirca nel mezzo tra l'alta conducibilità dei metalli e quella assolutamente trascurabile dei dielettrici.



Composizione di un cristallo semiconduttore, per esempio Germanio

In un centimetro cubo di cristallo semiconduttore si trovano circa 10^{22} atomi.



In un cristallo di semiconduttore puro e privo di disuniformità, non si trovano portatori di carica liberi alle basse temperature. Gli elettroni dell'orbita esterna dell'atomo rappresetano i legami tra gli atomi del cristallo.
Per adduzione di calore od irraggiamento luminoso, gli elettroni possono sciogliersi dai loro legami. Appaiono dei portatori di carica in movimento libero.

SEMICONDUTTORI DROGATI

Il Germanio (Ge) ed il Silicio (Si) sono i più importanti semiconduttori elettronici. Il loro posto è nel IV° gruppo del sistema periodico degli elementi.
Questi atomi possiedono 4 elettroni nell'orbita più esterna.

Estratto dalla tabella del sistema periodico ▶ degli elementi.

III	IV	V
B	C	N
Al	Si	P
Ga	Ge	As
In	Sn	Sb

Accanto al Germanio ed al Silicio, si impiegano come semiconduttori anche composti tra elementi del III° e del V° gruppo, come per esempio GaAs (Arseniuro di Gallio) ed InSb.

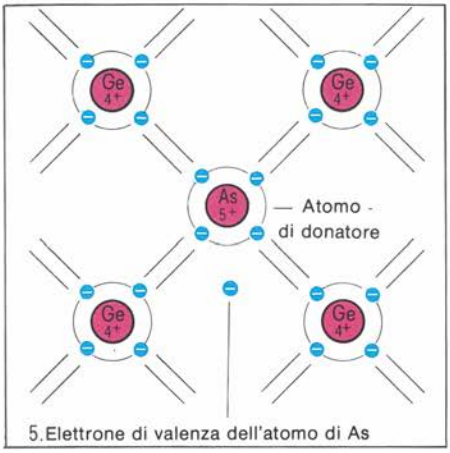
Drogaggio n

L'introduzione di atomi del V° gruppo (= 5 elettroni esterni) fornisce elettroni liberi. Il semiconduttore diventa **conduttore di tipo n** (portatori di carica negativa).
Gli atomi che cedono elettroni si chiamano **Donatori**. L'atomo di un donatore si carica positivamente per la cessione di un elettrone.

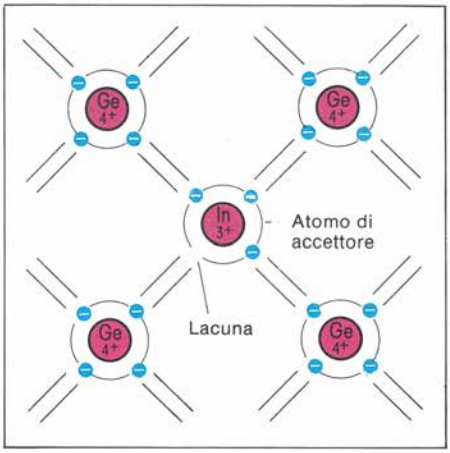
Drogaggio p

Atomi del III° gruppo (= 3 elettroni esterni) producono "buchi ettronici" ("Lacune"). Quando gli elettroni saltano dagli atomi vicini nei "buchi", le lacune viaggiano come portatori di carica positiva attraverso il cristallo. Il semiconduttore diviene **conduttore di tipo p**. Gli atomi che prelevano elettroni (= che producono lacune), si chiamano **Accettori**. L'atomo accettore si carica negativamente prelevando l'elettrone.

Introduzione di un atomo donatore (As)



Introduzione di un atomo accettore (In)



Esempio
Drogaggio normale: resistenza specifica circa 5 Ω cm, un atomo del donatore ogni 10^7 atomi di Si.

n

Esempio
Drogaggio forte: resistenza specifica circa 0,03 Ω cm, un atomo del donatore ogni 10^4 atomi di Si.

n^+

Esempio
Drogaggio normale: resistenza specifica circa 2 Ω cm.
Un atomo di accettore su 10^6 atomi di Si.

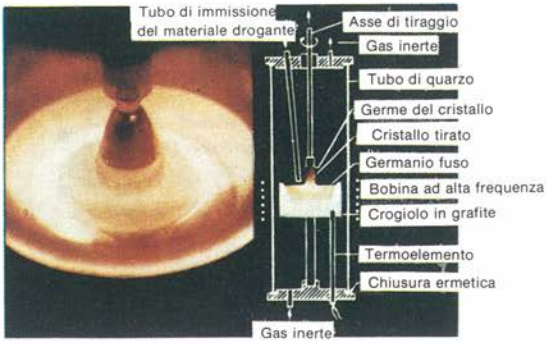
p

Esempio
Drogaggio forte: resistenza specifica circa 0,05 Ω cm, 1 atomo di accettore su 10^4 atomi di Si.

p^+

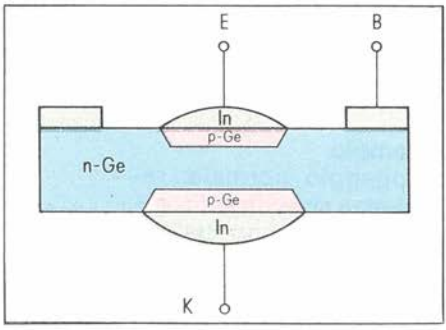
TECNICHE DI DROGAGGIO

Il drogaggio è possibile:
- Nel tiraggio del cristallo
- Per lega
- Per diffusione
- Per impianto

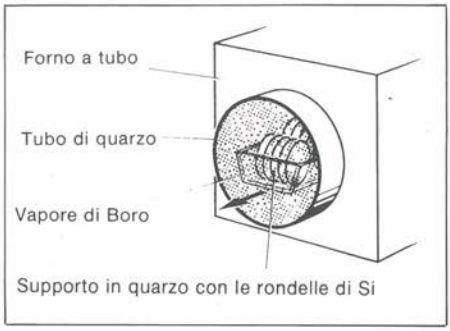


● Tiraggio del cristallo.
I materiali droganti (per esempio Antimonio) vengono aggiunti al bagno di fusione del cristallo.
Tirando il monocristallo, gli atomi del materiale drogante si inseriscono nel reticolo cristallino.

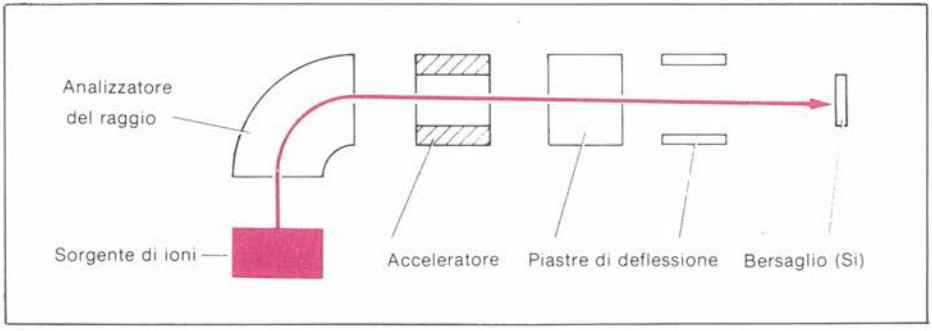
● Lega.
Nei transistori al Germanio del tipo a lega, delle sferette di Indio vengono fatte fondere sul cristallo di Ge. Ge ed In fondono insieme. Alla solidificazione, degli atomi di Indio si inseriranno nel reticolo del Ge.



● **Diffusione**.
Le rondelle ricavate dal monocristallo di Si vengono esposte, alla temperatura di 1000 °C, al materiale drogante vaporizzato, per esempio Boro. Gli atomi di Boro si diffondono nel cristallo di Silicio tipo n, e producono una zona a conduzione p. Le zone a conduzione n si ottengono diffondendo del Fosforo.



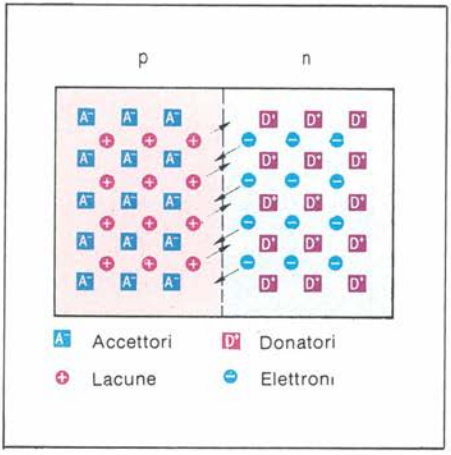
● **Impianto**.
Gli atomi elettricamente caricati (ioni) di un materiale drogante allo stato gassoso vengono accelerati in un campo elettrico e quindi proiettati nel cristallo semiconduttore.
L'impianto ionico permette una concentrazione ed una localizzazione molto precisa delle zone di drogaggio.

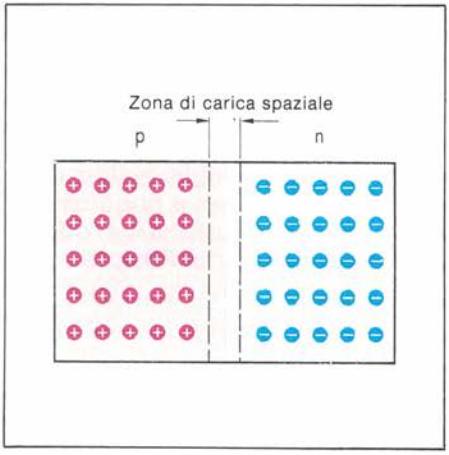


COPPIA PN ED EFFETTO GIUNZIONE

Le transizioni pn appaiono alle superfici limite tra le zone cristalline drogate p e quelle drogate n. In questo punto esse formano una giunzione.

Coppia pn senza polarizzazione esterna





Quando una zona cristallina a conduzione p ed una a conduzione n si affacciano una all'altra, dal materiale p si diffondono delle lacune verso il materiale n, e dal materiale n al materiale p si diffondono degli elettroni. Le diverse concentrazioni dei portatori di carica mobili tendono ad uguagliarsi.

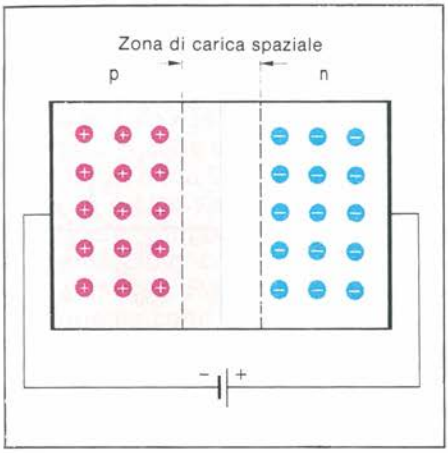
Per la perdita di lacune rimangono gli accettori non compensati a carica negativa nella zona p. Di conseguenza il materiale p si carica negativamente.

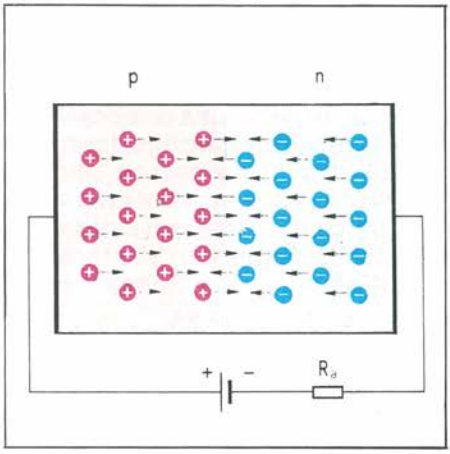
Per la perdita di elettroni, restano nella zona n i donatori a carica positiva non compensati. Il materiale n si carica di conseguenza positivamente.

Alla separazione tra la zona p e la zona n si forma quindi una tensione (=tensione di diffusione). Di conseguenza in questo punto si ha un arresto del processo di equilibramento tra lacune ed elettroni.

Alla giunzione pn appare una zona ad alta resistenza ohmica impoverita di portatori di carica mobili, detta "zona di carica spaziale".

Giunzione pn con polarizzazione esterna





Una tensione negativa applicata alla zona p ed una tensione positiva applicata alla zona n aumentano la larghezza della zona di carica spaziale ad alta resistività.
La corrente è limitata ad un valore piccolissimo.

"Direzione di sbarramento"

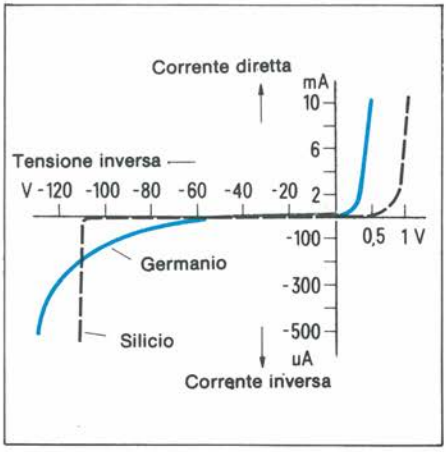
Una tensione positiva applicata alla zona p ed una tensione negativa applicata alla zona n diminuiscono la larghezza dello strato di sbarramento.
I portatori di carica possono passare attraverso la giunzione pn e quindi può passare una corrente.

"Direzione di conduzione"

IL RADDRIZZATORE (DIODO)

I diodi sono componenti dotati di una giunzione pn.
Resistenza elettrica del diodo:
- Alta nella direzione di sbarramento
- bassa nella direzione di conduzione

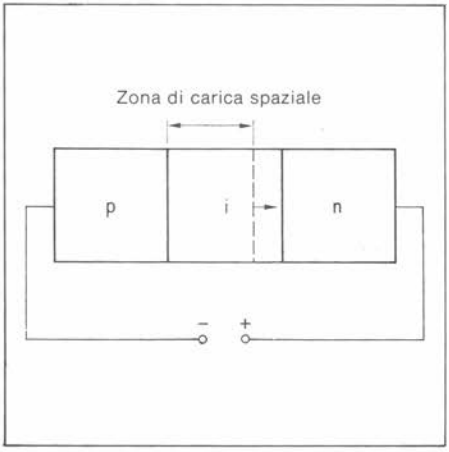
Se ad un diodo si applica una tensione alternata, **la corrente passa prevalentemente nella direzione di conduzione**. Avviene una **rettificazione**. La **corrente di conduzione** (corrente diretta) comincia a passare non appena la tensione applicata nel verso di conduzione supera un determinato **valore di soglia** pari alla tensione di diffusione. (per il Germamio: 0,4 V, per il Silicio: 0,8 V).



La **corrente nella direzione di sbarramento (corrente inversa)** può essere di circa 10^7 volte minore della corrente diretta.
Essa non scompare completamente, in quanto esiste sempre un piccolo numero di elettroni nella zona p e di lacune nella zona n, ed appaiono costantemente nuove coppie di portatori di carica in corrispondenza alle discontinuità del reticolo cristallino.
La corrente inversa aumenta fortemente con l'aumentare della temperatura.
Commutando dalla direzione di conduzione alla direzione di sbarramento, si ha un ritardo nella commutazione, in quanto lo svuotamento della giunzione pn dai portatori di carica richiede un certo tempo. Nei diodi per commutazione questo tempo può essere ridotto fino a 10^{-8} secondi.

Rettificatori per tensioni inverse molto alte (alcuni kiloVolt)

Tra la zona p e la zona n viene mantenuta una zona cristallina non drogata larga circa 0,2 mm (zona **i**). La zona di carica spaziale si può così estendere lungo tutta la zona **i** aumentando di conseguenza la tensione inversa. Polarizzando in conduzione, la zona **i** viene colmata da entrambi i lati dai portatori di carica.



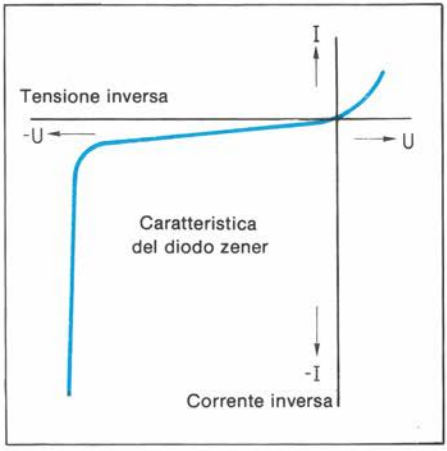
Raddrizzatore p-i-n

DIODI PER IMPIEGHI SPECIALI

Ci sono diversi tipi di diodi destinati ad impieghi speciali, p.es.:
- diodi Zener
- diodi capacitivi
- diodi Schottky

I diodi Zener

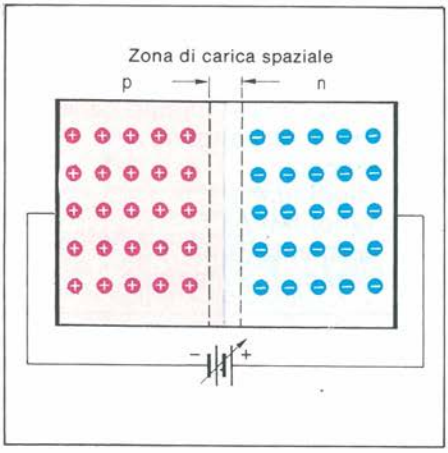
Ad una determinata tensione inversa la corrente inversa aumenta improvvisamente. Cause: liberazioni di elettroni legati, dal reticolo, a causa dell'elevata intensità di campo (= effetto Zener) oppure a causa di urti da parte di elettroni molto veloci (moltiplicazione a valanga dei portatori di carica per ionizzazione per urto). L'origine ed il valore della tensione di rottura dipendono dal tipo di drogaggio.
L'"effetto Zener" è stato spiegato nel 1934 dal fisico C. Zener.



Applicazioni: Stabilizzazione delle tensioni, limitazione dell'ampiezza dei segnali.

Diodi capacitivi (varicap)

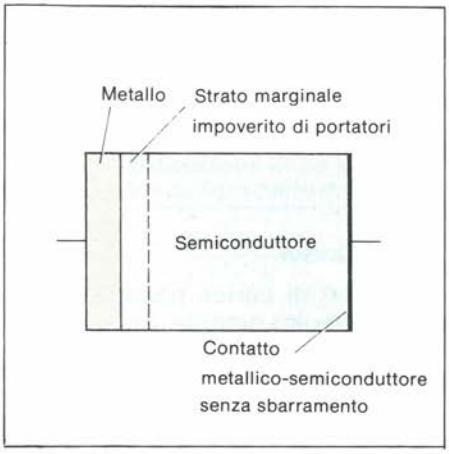
La zona di carica spaziale in vicinanza della giunzione pn agisce come un condensatore, le cui cariche siano suddivise nello spazio.
Una variazione della tensione ai capi del diodo fa variare lo spessore di questa zona e, di conseguenza, la capacità della giunzione pn (maggiore tensione = zona di carica spaziale con maggior spessore = capacità inferiore). Analogia: due armature di condensatore che vengono fatte allontanare tra loro.



Applicazioni: sintonia di circuiti oscillanti.

I diodi Schottky

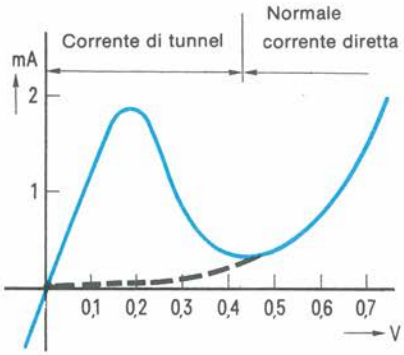
Al posto della giunzione pn agisce da strato di sbarramento un contatto a semiconduttore metallico. Cause: il diverso lavoro di estrazione degli elettroni dal semiconduttore e dal metallo, producono uno strato periferico a concentrazione ridotta di portatori di carica nel semiconduttore. L'effetto dello strato di sbarramento, scoperto nel 1874 da F. Braun, è stato chiarito teoricamente nel 1939 da W. Schottky.
Non esiste ritardo di commutazione tra conduzione e sbarramento come avviene nelle giunzioni pn, per cui questo tipo di diodo si presta alla rettificazione delle frequenze più alte.
Contatti metallo - semicondutture privi di effetto giunzione si ottengono solo per certe combinazioni dei due elementi.



Applicazioni: commutatori veloci, raddrizzatori per microonde.

DIODI PER MICROONDE

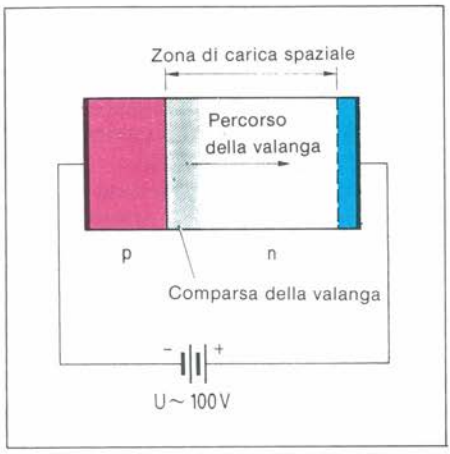
Per la produzione o l'amplificazione di oscillazioni nel campo delle microonde, vengono impiegati:
- diodi tunnel
- diodi IMPATT
- elementi Gunn
- varactori a memoria



Tipica curva caratteristica di un diodo tunnel.

I diodi tunnel

I portatori di carica passano già a tensioni molto piccole, prima che si instauri la corrente diretta, attraverso le strette zone di carica spaziale ottenute grazie ad un elevato drogaggio p ed n, praticando un "tunnel" nella barriera anzichè valicarla. In questi dispositivi si produce una "corrente di tunnel", con la curva caratteristica del diodo che risulta parzialmente in discesa.
Applicazioni: amplificatori a basso rumore, oscillatori di conversione nel campo dei Gigahertz, commutatori veloci.



I diodi IMPATT (diodi ad effetto valanga).

Quando la tensione inversa alla giunzione pn, supera un determinato valore critico (tensione di rottura), appare nella zona, per l'effetto di ionizzazione da urto dovuto all'elevata intensità di campo, una "valanga" di portatori di carica. Questa oltrepassa la zona i debolmente drogata e raggiunge l'elettrodo esterno. Accordando il tempo di percorso, che dipende dalla larghezza della zona i, con la frequenza di un risonatore, si possono costruire oscillatori nella banda 3.....300 GHz con alta potenza impulsiva.
(IMPATT = IMPact Ionisation Avalanche Transit Time = Tempo di transito per valanga da ionizzazione d'impatto.)
Applicazioni: Amplificatori ed oscillatori a microonde.
Diodi Trapatt
Diodi IMPATT il cui funzionamento richiede campi elettrici estremamente forti. Con un adatto circuito esterno, il campo di ionizzazione si estende via via all'intera zona di cari-

ca spaziale. Si forma un plasma di portatori di carica.
(Trapatt = TRApped Plasma Avalanche Triggered Transit = Passaggio attivato a valanga nel plasma confinato).

Applicazioni Trasmettitori ad impulsi.

clico, il quale viene utilizzato per la produzione di oscillazioni.
L'effetto Gunn è stato descritto nel 1964 da J.O.Gunn.
Applicazioni: oscillatori per microonde.

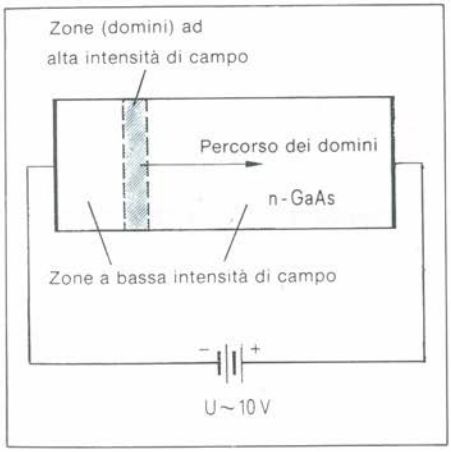
Elementi Gunn

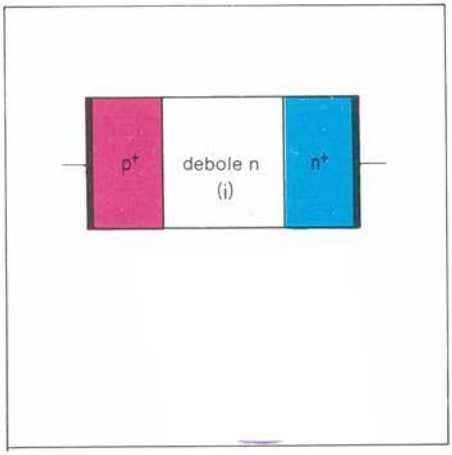
Sono formati da cristalli omogenei di tipo n di Arseniuro di Gallio, privi di giunzione pn. Aumentando la tensione applicata aumenta la velocità degli elettroni. Ad una determinata intensità di campo critica, la velocità diminuisce nuovamente a causa di un rafforzamento del legame degli elettroni nel reticolo cristallino. Dato che questa intensità di campo si ha soltanto in una stretta zona, appare una zona di ristagno degli elettroni, una "sezione a campo elevato" che viaggia attraverso al cristallo. La formazione di queste sezioni, il loro movimento e la loro scomparsa avvengono secondo un andamento ci-

Varactori a memoria

(Snap - off Varactors = Varactori a commutazione veloce).

Polarizzando in conduzione, i portatori di carica vengono conservati nella zona n debolmente drogata. Commutando la polarizzazione in direzione di sbarramento, i portatori di carica arretrano: questo arretramento cessa improvvisamente allo svuotamento della zona. Questo procedimento (che dura 100 psec) ha un elevato contenuto di armoniche, e viene utilizzato per produrre segnali di potenza a microonde (fino a 60 GHz).
I diodi PIN sono un caso particalare dei diodi Varactor. Vengono impiegati come commutatori o resistenze variabili nel campo delle microonde.



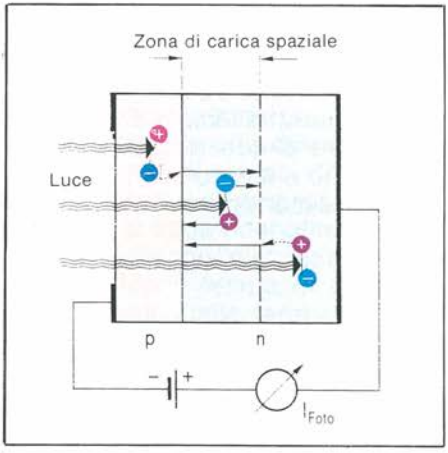


COMPONENTI FOTOSENSIBILI

Trasformano segnali luminosi
in segnali a corrente e tensione elettrica.

Fotodiodi

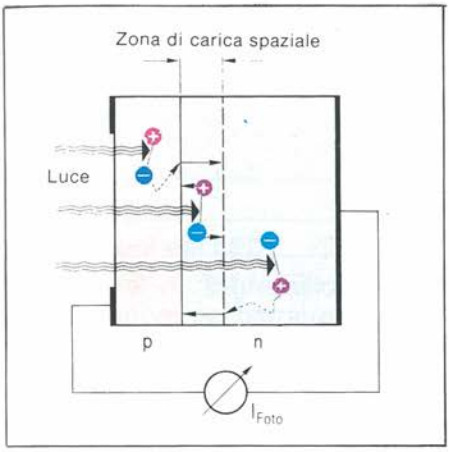
La luce incidente libera elettroni dal reticolo cristallino. Appaiono di conseguenza elettroni e lacune liberi in soprannumero. Essi viaggiano verso la zona di carica spaziale ed aumentano la corrente di giunzione (corrente fotoelettrica) in proporzione all'intensità luminosa.



Applicazioni: Misura della luce (per esempio in fotografia), barriere fotoelettriche, posizionamento di macchine utensili, comandi a distanza con raggi infrarossi, trasmissione di segnali acustici con portante infrarossa, ed in generale per la rivelazione di segnali luminosi ad alta frequenza.

Fotoelementi

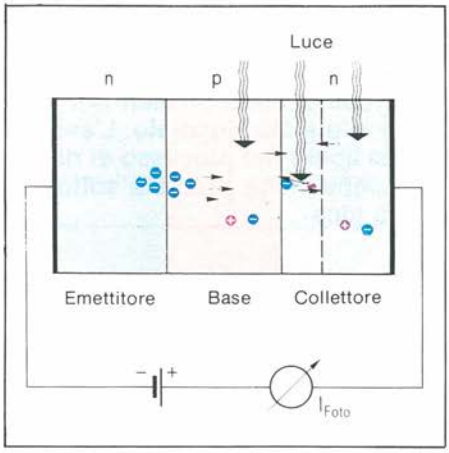
Come nei fotodiodi, appaiono portatori di carica liberi a causa dell'irraggiamento. A differenza del fotodiodo, non viene applicata una tensione esterna alla giunzione pn. Quando gli elettroni e le lacune raggiungono la giunzione pn, essi vengono separati tra di loro dal campo esistente nella zona di carica spaziale. Appare una tensione fotoelettrica che causa il passaggio di una corrente fotoelettrica nel circuito esterno. L'energia luminosa viene di conseguenza convertita in energia elettrica.



Applicazioni: Produzione di energia elettrica mediante cellule solari (rendimento circa 11%), misurazione della luce.

Fototransistor

Si tratta di un transistor (vedi al capitolo relativo) che si comporta come un fotodiodo con amplificatore incorporato.
La giunzione pn tra base e collettore funziona da diodo fotosensibile. La corrente fotoelettrica che appare su questa giunzione passa anche attraverso l'emettitore.
Questa corrente di emettitore amplifica di circa 500 volte la corrente fotoelettrica originale grazie all'effetto transistor.

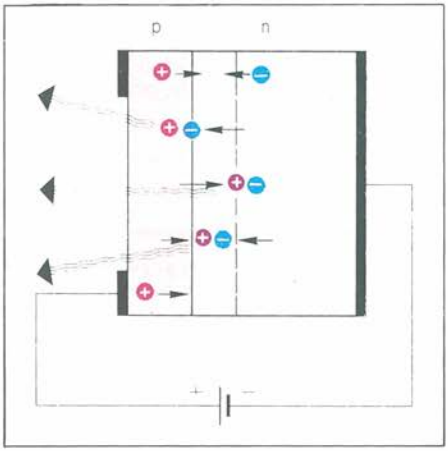


Applicazioni: Apparecchi di controllo e regolazione luminosi, analisi di schede e nastri perforati, accoppiatori optoelettronici.

DIODI LUMINESCENTI (LED)

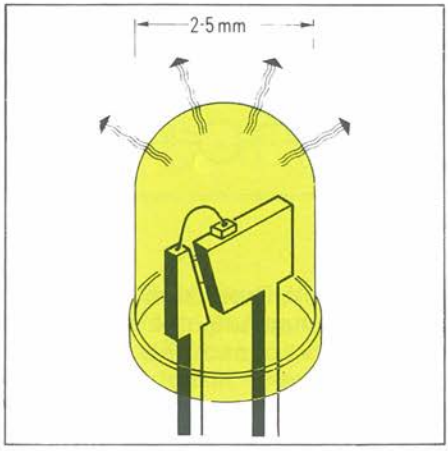
Si tratta di diodi che emettono luce. Essi convertono la corrente elettrica in radiazioni luminosa od infrarossa.

Funzionamento Si tratta dell'inverso dell'effetto fotoelettrico. Elettroni e lacune liberi si riuniscono emettendo di conseguenza luce. I LED (diodi emettitori di luce) sono formati da un cristallo provvisto di una giunzione pn. Applicando una tensione nel verso della conduzione, gli elettroni migrano dalla zona n e le lacune dalla zona p, passando attraverso la giunzione pn. Quindi si ricombinano, ossia gli elettroni ritornano allo stato vincolato. L'energia che si libera nel processo di ricombinazione viene irradiata sotto forma di luce.



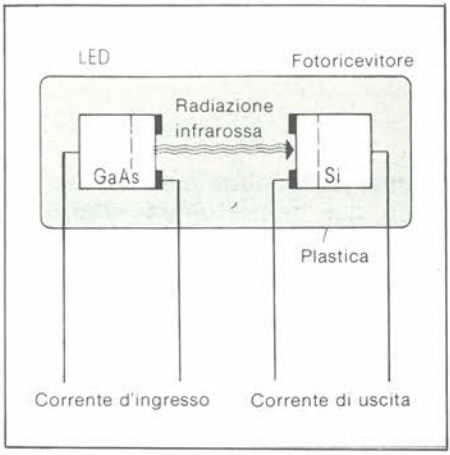
Generalità

il tipo del cristallo ed il drogaggio determinano il **colore** della luce:
GaAs:
infrarosso
GaAsP, a seconda del contenuto in fosforo:
da rosso a giallo
GaP con drogaggio di Zinco ed Ossigeno:
rosso
GaP con drogaggio di Azoto:
verde e giallo
Cristalli con **due** giunzioni pn corrispondenti irradiano in rosso, verde o giallo, a seconda della tensione applicata.



▲ Diodo luminescente in contenitore plastico trasparente.

Vantaggi nei confronti delle lampade ad incandescenza: durata di vita 100 volte maggiore, e dopo non si ha un'interruzione improvvisa ma una graduale diminuzione dell'irradiazione luminosa.
Tempo di risposta 10^6 volte più veloce (circa 10 ns); forma esterna molto adatta al montaggio, atta a permettere alte densità di componenti, insensibilità alle sollecitazioni meccaniche.



Applicazioni dei LED

Lampadine di segnalazione, sorgenti luminose per barriere fotoelettriche, visualizzatori alfanumerici.

Accoppiatori optoelettronici

Un diodo luminescente sistemato in un contenitore insieme ad un fotodiodo o ad un foto-transistor, (trasmettitori e ricevitori di luce) forma un elemento di accoppiamento. Una corrente fatta passare nel circuito del diodo luminescente produce luce, la luce produce una corrente nel circuito del fotoricevitore. L'accoppiatore funziona come un relè.

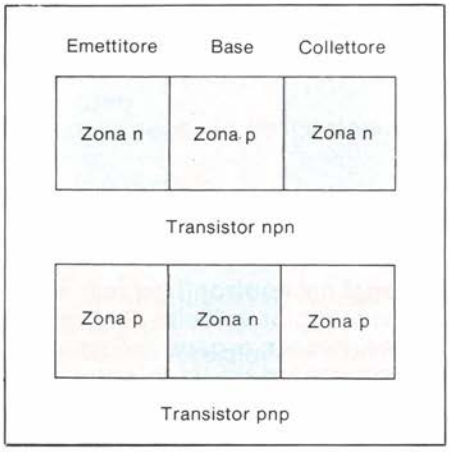
Vantaggi nei confronti dei relè meccanici: maggior velocità di commutazione, nessun organo meccanico, alto isolamento tra i due circuiti.

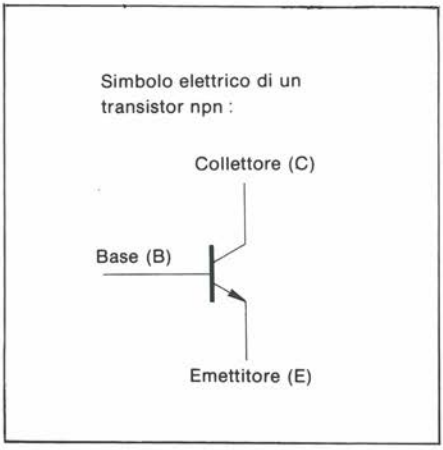
Svantaggio: bassa potenza.

IL TRANSISTOR BIPOLARE

Funziona come amplificatore di segnali elettrici (amplificatore a cristallo) oppure come commutatore.

Si chiama "bipolare" perchè, al contrario del transistor ad effetto di campo, vi sono coinvolti portatori di carica di entrambe le polarità (lacune ed elettroni). Il transistor bipolare consiste in tre zone di conducibilità diversa: pnp oppure npn.





Funzionamento dei transistori npn (una spiegazione analoga vale per i transistori pnp)

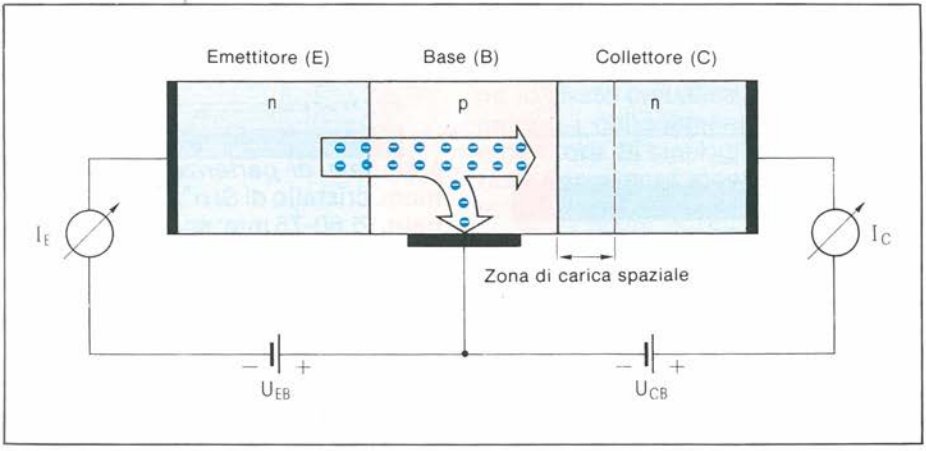
Il transistor possiede due giunzioni pn, una tra emettitore e base, ed una tra base e collettore. Tra base e collettore viene applicata una tensione inversa (U_{CB}). Nel circuito di collettore passa una piccola corrente I_C (corrente di perdita del collettore). Se viene applicata alla giunzione pn emettitore-base una tensione nel verso della conduzione (U_{EB}), gli elettroni vengono "emessi' dall'emettitore verso la zona di base (corrente di emettitore). Una piccola parte di questi elettroni attraversa la base. Essi vengono a trovarsi ad un certo momento nel campo elettrico della giunzione pn tra base e collettore, amplificando la corrente di collettore. A seconda della tecnologia usata si distingue tra:

Transistori a lega (transistori di bassa frequenza)

Transistori MESA Per ottenere strutture particolarmente raccolte, l'emettitore e la base stanno su di un rilievo a forma di altopiano ("mesa") ricavato dal cristallo per incisione chimica.
Molto utile per la produzione di transistori al Germanio destinati ad impieghi in UHF.

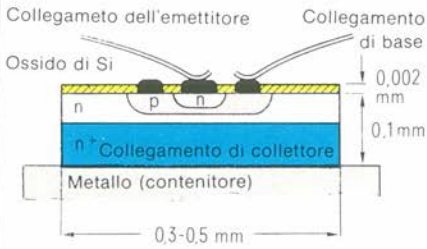
Transistori planari

Transistori epitassiali a **semplice** e **tripla diffusione**



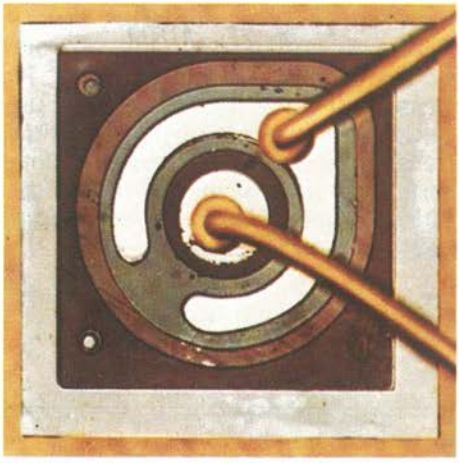
IL TRANSISTOR AL SILICIO IN TECNICA PLANARE

Tra tutte le tecnologie usate nella produzione dei transistori e degli altri componenti a semiconduttore, la tecnica planare è quella che ha acquistato il maggior significato.



Sezione attraverso un transistor planare npn.

I transistori planari sono:
- Particolarmente affidabili grazie alla protezione dell'ossido di Si;
-Adatti alle alte frequenze grazie alle piccole dimensioni;
-Poco costosi dal punto di vista della produzione, in quanto da una rondella di Silicio si possono ricavare contemporaneamente migliaia di sistemi.

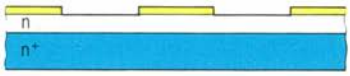


Un transistor planare visto dall'alto.

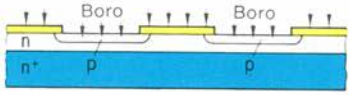
Materiale di partenza: dischetto di monocristallo di Si n^+ altamente drogato, ∅ 50-75 mm; spessore 0,3 mm.

Epitassi: accrescimento di uno strato di Si drogato n dallo spessore di circa 10 μm (strato di collettore).

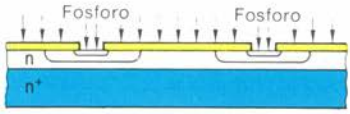
1ª ossidazione: Produzione di uno strato di SiO_2 spesso circa 2 μm.



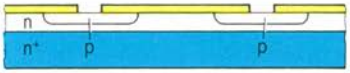
Processo di corrosione chimica: si ricavano delle finestre nello strato di ossido con l'aiuto di una maschera (fotolitografia).



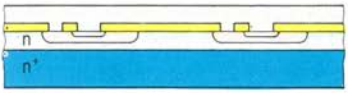
Diffusione della base: Gli atomi di Boro si diffondono nel cristallo attraverso le finestre praticato nello strato di ossido e producono la zona di base drogata p.



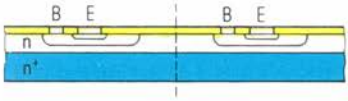
2ª *ossidazione* / attacco chimico: Vengono nuovamente ossidate le superfici, ed avviene un nuovo attacco chimico per aprire le finestre destinate alla diffusione degli emettitori.



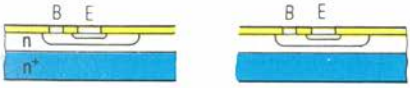
Diffusione degli emettitori: Gli atomi di Fosforo si diffondono attraverso le aperture nell'ossido e producono la zona di emettitore a conduzione n.



3ª *ossidazione* / attacco chimico / metallizzazione: Le superfici vengono nuovamente ossidate, e vengono incise le aperture per i contatti metallici. Tutta la superficie viene quindi metallizzata sotto vuoto (per esempio con Alluminio).



Incisione delle piste conduttrici / smerigliatura posteriore: Si allontana lo strato metallico fino a che appaiono i collegamenti di base e di emettitore. Si smeriglia il lato posteriore fino a raggiungere uno spessore del cristallo di 0,1 mm.



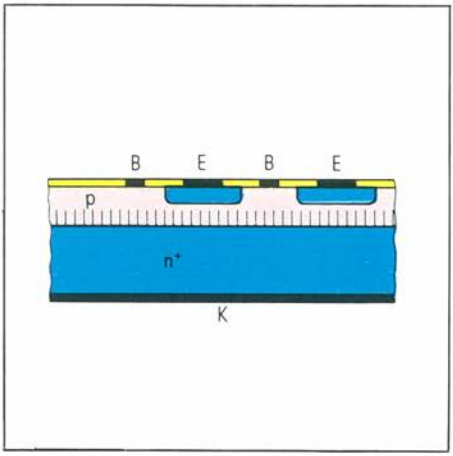
Taglio dei sistemi: Si praticano delle scalfitture tra i vari elementi sulla rondella cristallina e si separano per rottura i singoli transistori. Si saldano i terminali e si inseriscono nei contenitori.

TRANSISTORI DI POTENZA AL SILICIO

Per le maggiori potenze, accanto alla tecnica planare appaiono le seguenti tecnologie:
- epibase
- a semplice diffusione
- a tripla diffusione

I transistori epibase

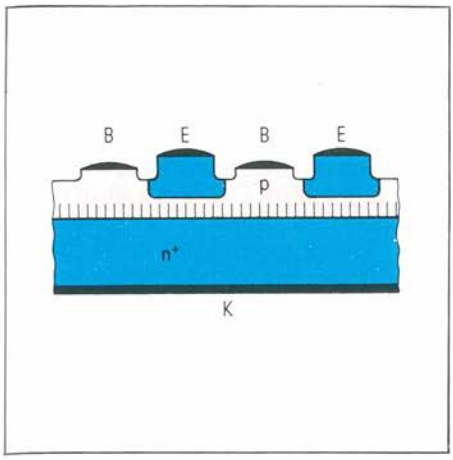
Da un cristallo di Silicio a conduzione n^+ si ricava lo strato di **base** per mezzo di un processo **epitassiale** che comprende l'intera superficie. L'emettitore ed i contatti vengono prodotti con la tecnica planare.
I transistori epibase possiedono una base più spessa e più omogeneamente drogata rispetto ai tipi planari. Ne consegue una maggior capacità di carico a causa del minore accoppiamento termico ed elettrico tra collettore ed emettitore.
Si possono produrre sia transistori npn che pnp. Potenza di perdita dissipabile: fino a circa 90 W (15 A)*; frequenza limite: 5 MHz

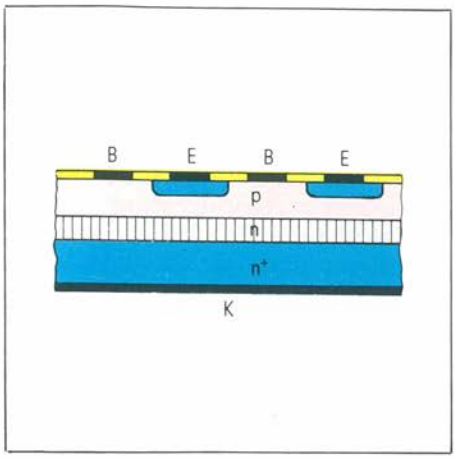


Estensione della zona di carica spaziale

Applicazioni: apparecchiature elettroniche per auto, stadi finali audio complementari, transistori di commutazione universali.

*Includere in un contenitore (metallico o plastico) di buona dissipazione termica.





Transistori a semplice diffusione
(single diffused transistors)

Materiale di partenza: rondelle di Silicio tipo p. L'emettitore ed il collettore vengono drogati da entrambi i lati con un unico procedimento di diffusione n^+. Il collettore occupa tutta la superficie, mentre l'emettitore ha di solito la forma di dita.
L'estensione dell'area di base è ancora maggiore che nei transistori epibase. Di conseguenza il transistor a semplice diffusione è particolarmente robusto e lo si può impiegare alle maggiori potenze, per quanto ciò avvenga a spese della velocità di commutazione.
È possibile costruire soltanto transistori npn. Potenza dissipabile: fino a circa 120 W (15 A)*; frequenza limite: 1 MHz.
Applicazioni: Commutatore di potenza, Regolatori lineari negli alimentatori.

Transistori a tripla diffusione
(triple diffused transistors)

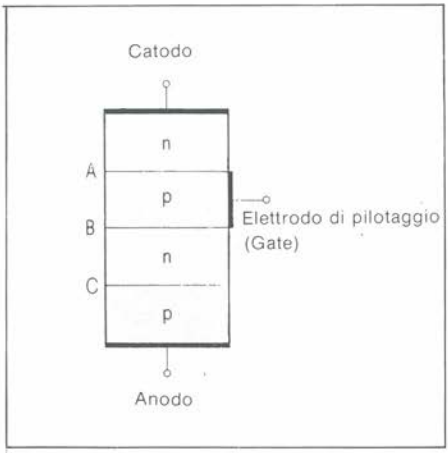
Materiale di partenza: rondelle cristalline di Silicio debolmente drogate n.
La prima diffusione (Fosforo) produce la zona inferiore fortemene drogata n^+. La seconda diffusione (Boro) forma la zona di base p che comprende tutta la superficie. La terza diffusione (Fosforo) produce le zone n degli emettitori come nella tecnica planare. Rispetto ai transistori epibase ed a quelli a semplice diffusione, i transistori a tripla diffusione possiedono una zona di collettore molto estesa e debolmente drogata (da 20 a 40 micron), nella quale si può estendere la carica spaziale alle alte tensioni.
Di norma si producono solo transistori npn.
Potenza dissipabile: fino a circa 200 W *
Vantaggi: tensioni di collettore di alcuni kV, tempi di commutazione brevi.

Applicazioni: Sistemi di accensione per autoveicoli; deflessione orizzontale nei televisori, regolatori in commutazione per alimentatori.

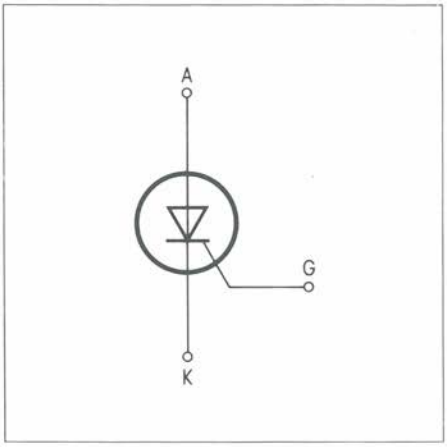
IL TIRISTOR ED IL TRIAC

Il tiristor
(SCR - Silicon Controlled Rectifier = Raddrizzatore controllato al Silicio); funziona come un diodo la cui corrente passante può venire pilotata. È un elemento di commutazione bistabile.

Il tiristor possiede quattro zone a drogaggio differente (pnpn) e quindi comprende tre giunzioni pn, come pure tre terminali ("triodo a 4 strati").



▲ Costruzione schematica di un tiristor (A, B, C = giunzioni pn)



◀ Simbolo elettrico di un tiristor.

STATI FUNZIONALI DI UN TIRISTOR

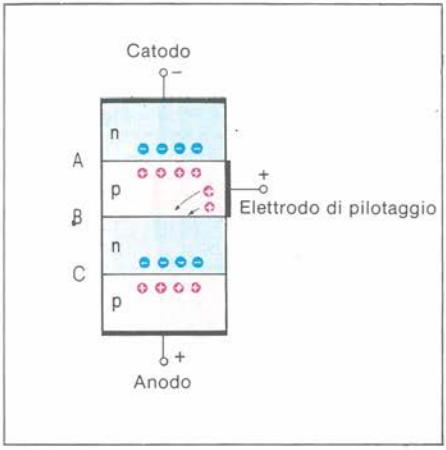
"Stato di interdizione"

Catodo positivo, anodo negativo. Giunzioni pn A e C interdette. Indipendentemente dallo stato dell'elettrodo di pilotaggio passa solo una corrente debolissima di perdita.

"Stato di blocco"

Anodo positivo, catodo negativo, elettrodo di pilotaggio nullo o negativo rispetto al catodo. La giunzione pn B è interdetta. Attraverso al tiristor non passa corrente.

"Stato di conduzione"

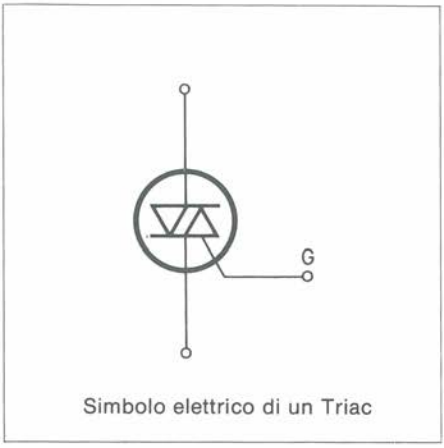


Anodo positivo, catodo negativo come nello stato di blocco.
Con una tensione positiva all'elettrodo di pilotaggio, la giunzione pn B viene colmata di portatori di carica e diventa conduttrice con bassa resistenza.
Il tiristor "si accende".

La corrente anodica resta, anche se viene tolta la corrente di pilotaggio. Per spegnere il tiristor essa deve essere ridotta ad un valore inferiore ad un certo livello di soglia (corrente di mantenimento).

Il Triac

Due strutture tipo tiristor connesse in parallelo, ma con orientamenti invertiti, disposte sulla stessa piastrina di cristallo di Silicio (chip), formano il componente detto Triac, che, al contrario del tiristor, può commutare correnti in entrambe le direzioni.



Simbolo elettrico di un Triac

Applicazioni del tiristor e del triac: Pilotaggo e commutazione di correnti alternate (per esempio modulatori di luce, regolazione del numero dei giri dei motori).

Diac: Due diodi connessi uno dopo l'altro con polarità invertita (pn - np) su di un unico cristallo di Silicio. Polarizzato con tensione alternata, fornisce, al superamento della tensione di rottura dei diodi, dei brevi impulsi di corrente adatti al pilotaggio dei Triac.

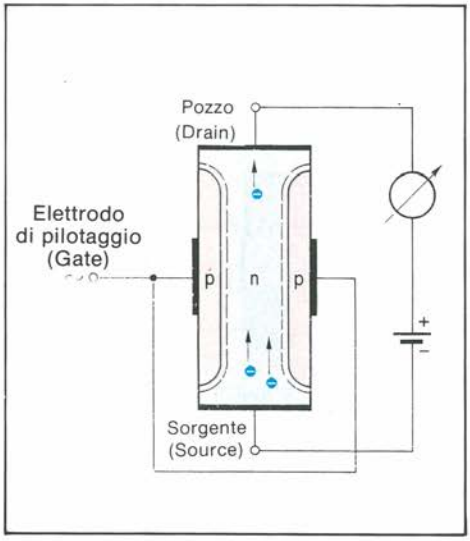
IL TRANSISTOR AD EFFETTO DI CAMPO (FET)

Il transistor ad effetto di campo lavora, al contrario di quanto avviene con i transistori bipolari, solo con portatori di carica di un tipo, elettroni oppure lacune (transistor unipolare).

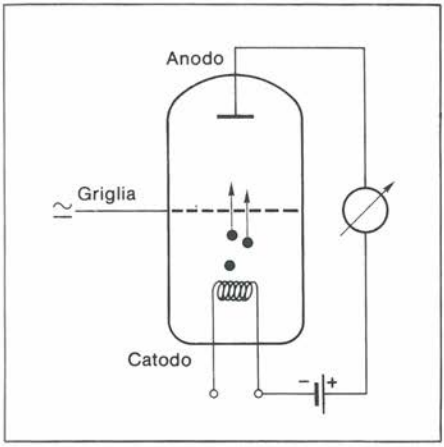
Si distinguono: Transistori ad effetto di campo a giunzione oppure del tipo MOS.

Transistori ad effetto di campo a giunzione (= Junction - FET, JFET)

Alle estremità di un cristallo di tipo n viene applicata una tensione continua. Gli elettroni scorrono dalla "sorgente" (source) verso il "pozzo" (drain).
La larghezza del canale viene determinata da due zone a diffusione p disposte lateralmente al canale e dalla tensione negativa a queste applicata. Se si aumenta la tensione negativa di "gate" (cancello o porta), le zone di carica spaziale si allargano a causa dell'"effetto di campo" entro il canale provocando il restringimento del passaggio della corrente. La tensione all'elettrodo di pilotaggio regola in questo modo la corrente tra source e drain.



Applicazioni: I FET a giunzione sono prevalentemente usati come amplificatori per segnali analogici. I MOSFET vengono usati come elementi di commutazione digitale nell'integrazione a grande scala.



Il transistor ad effetto di campo a giunzione è paragonabile alla valvola amplificatrice.
Nella valvola, la corrente elettronica scorre nel vuoto tra il catodo e l'anodo. La tensione presente alla griglia pilota questo flusso di elettroni: una tensione positiva lo rinforza, una tensione negativa lo indebolisce.

Differenza fra transistor bipolare e transistore ad effetto di campo

Il funzionamento dei transistori bipolari si basa sull'iniezione dei portatori di carica dall'emettitore nella base. Il " transistore ad iniezione" è pilotato in corrente e "bipolare".
Nei transistori ad effetto di campo, la conducibilità del cristallo tra due elettrodi viene pilotata da una tensione.
Il percorso della corrente viene ristretto od allargato dal campo provocato da questa tensione. Il FET è "unipolare", ossia la corrente viene trasportata da cariche di un unico tipo.

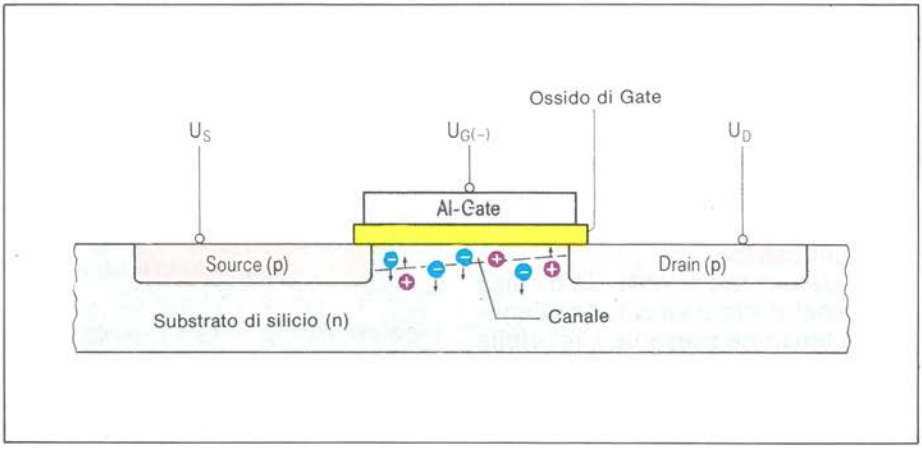
IL TRANSISTOR MOS (MOS - FET).

(**M**etal - **O**xide - **S**emiconductor - **F**ield - **E**ffect - **T**ransistor)

Una tensione di pilotaggio influenza la conducibilità di un sottile strato superficiale nel cristallo semiconduttore.
Il transistor MOS è di decisiva importanza nell'integrazione a grande scala.

Esempio

Transistor MOS a canale p del tipo a riempimento. In assenza di tensione applicata all'elettrodo di gate, (U_G) non passa corrente tra source e drain. Le giunzioni pn impediscono il passaggio della corrente.
Una tensione negativa applicata al gate spinge gli elettroni verso l'interno del cristallo, mentre attira le lacune verso la superficie. Appare un sottile strato a conduzione p al di sotto della superficie (canale). Tra i due campi a conducibilità p, il source ed il drain, può passare corrente.
Una forma particolare del transistor MOS, provvisto di due elettrodi di pilotaggio disposti uno dopo l'altro, è il tetrodo MOS. I tetrodi MOS vengono impiegati come semiconduttori singoli nei circuiti amplificatori per segnali analogici e negli oscillatori per la banda VHF ed UHF.



Sezioni di un transistor MOS a canale p

Due suddivisioni di carattere tecnologico:

MOS a canale p: vedi figura, substrato di Silicio a conduzione n; source e drain drogati p.
Formazione del canale mediante aumento del numero di cariche positive alla superficie del Silicio nella zona del canale.

MOS a canale n Substrato di Silicio a conduzione p; source e drain drogati n. Formazione del canale per aumento del numero delle cariche negative alla superficie del Silicio nella zona del canale.

Due suddivisioni riferite al comportamento elettrico

Transistori a riempimento (enhancement) (vedi figura)
La formazione del canale avviene a causa di una tensione applicata al gate. Senza tensione di gate il transistor non conduce.

Transistori a svuotamento (depletion)
Il canale è attivo in permanenza grazie al drogaggio della zona del canale. Senza tensione di gate il transistor conduce.
L'interdizione del transistor avviene applicando una tensione di gate.

I transistori MOS a canale p sono in prevalenza del tipo a riempiemento, e questo per motivi tecnologici.

I transistori MOS a canale n sono in prevalenza del tipo a svuotamento, sempre per motivi tecnologici.

Tensioni di soglia: è la tensione minima di gate che occorre **per produrre o per escludere un canale**.
Il suo valore è:
Nella tecnica MOS ad alta tensione di norma 2,5 - 4 V.

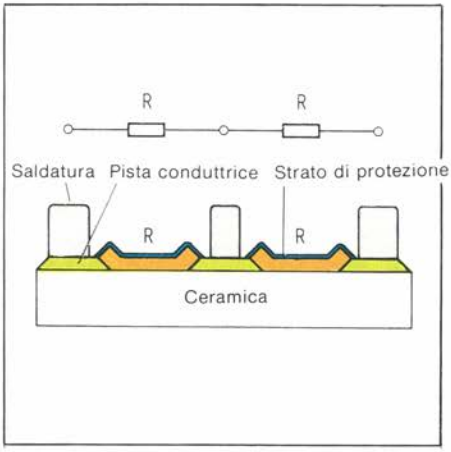
Nella tecnica MOS a bassa tensione di norma 0,8 - 2 V.
Direzione della corrente. A canale formato, il transistor è **conduttore in entrambe le direzioni**.

CIRCUITI A FILM

I circuiti a film sono dei circuiti RC oppure delle disposizioni di piste conduttrici eseguite in tecnica a film spesso oppure a film sottile su di un substrato di ceramica o di vetro.

Tecnica a film spesso.

La formazione delle piste conduttrici, delle resistenze e dei condensatori avviene mediante **miscele pastose** di leghe di metalli nobili come conduttori, di polveri dielettriche come isolanti, tenute insieme da leganti organici. Le paste vengono applicate al substrato con **tecnica serigrafica** ed ottengono la loro coerenza meccanica e le loro proprietà elettriche dopo un **riscaldamento in forno** a temperature che vanno da 730 a 1000°C. La regolazione dei valori elettrici avviene mediante sabbiature o con raggi laser.

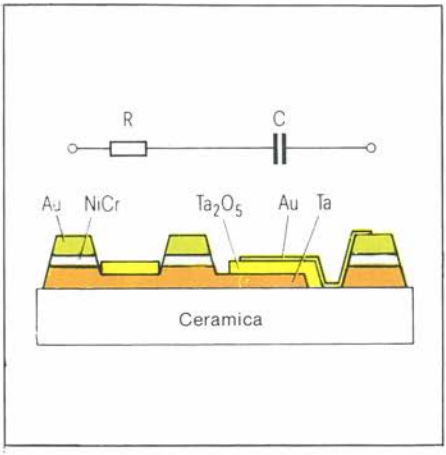


▲
Esempio di un circuito a film spesso (in sezione)

Applicazioni:
Resistenze e circuiti RC per basse frequenze.

Tecnica a film sottile.

La formazione delle piste conduttrici, delle resistenze e dei condensatori avviene usando **sottili strati metallici e strati di ossidi**. Questi vengono ottenuti per **deposizione sotto vuoto** e con l'uso di **maschere** (Au, NiCr, SiO) o per metallizzazione a polvere (NiCr/Au, Ta, Ta_2O_5) ed incisione chimica selettiva su di un substrato di ceramica, vetro o zaffiro.
Taratura dei valori elettrici mediante laser nel caso di Au/NiCr e mediante ossidazione anodica nel caso del Tantalio.



▲
Esempio di circuito a film sottile (in sezione)

Applicazioni: Resistenze e reti RC per alte frequenze.

CIRCUITI IBRIDI

I circuiti ibridi sono dei circuiti a film con aggiunti componenti discreti (condensatori, diodi, transistori) oppure componenti a semiconduttore integrati.

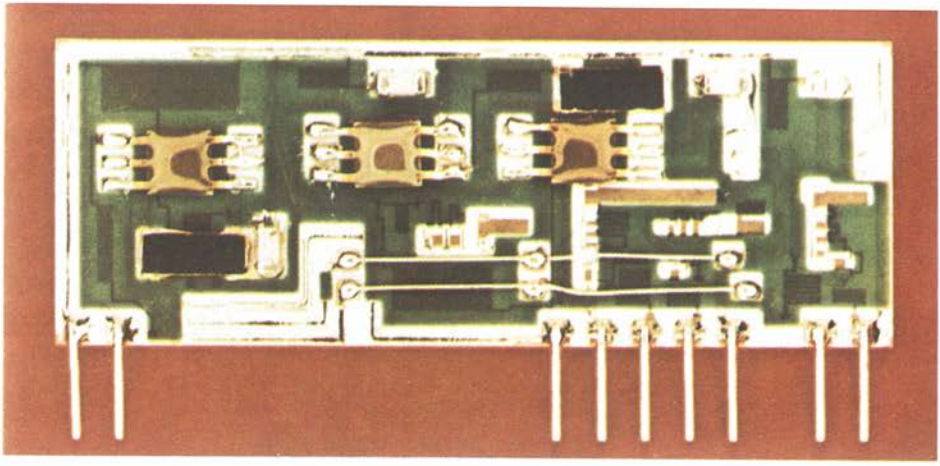
Confronto tra i circuiti ibridi ed i circuiti integrati monolitici:

Vantaggi: Le proprietà elettriche ottimali dei singoli componenti, come per esempio:
alta velocità di commutazione
alta tensione di esercizio e potenza di uscita.
Tolleranze ristrette (dopo taratura).
Funzioni analogiche e digitali (compresi filtri ed oscillatori compensati in temperatura).
Sono combinabili tra loro.
Inoltre:
breve tempo di progetto e messa a punto
commerciabili in piccole quantità

Svantaggi

Maggiori costi di finitura per quantità elevate
Minore affidabilità
Minore densità di integrazione

Applicazioni
Filtri attivi, oscillatori, convertitori D/A.

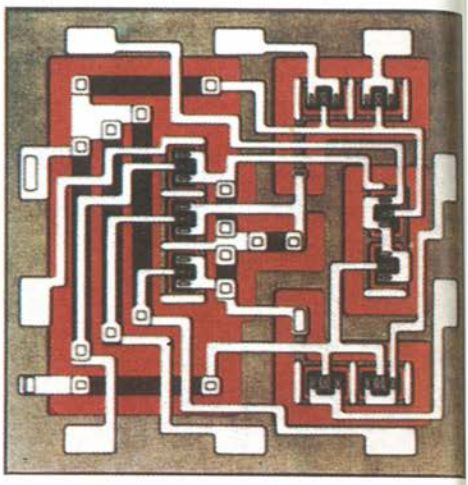


Esempio:
Circuito ibrido a film sottile (filtro RC attivo) munito di condensatori riportati ed amplificatori operazionali.
Dimensioni circa 80 x 25 mm.

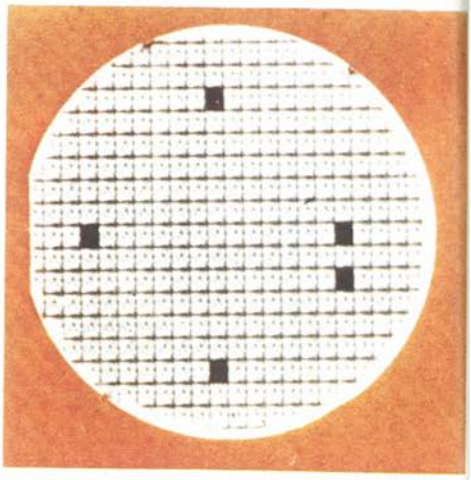
CIRCUITI INTEGRATI MONOLITICI

Tutti i componenti vengono prodotti in un processo di lavorazione **comune** (tecnica planare) su di **una** piastrina di Silicio monocristallina (chip).

Su di una fettina circolare di Silicio, ∅ circa 5 cm possono trovare posto, a seconda della grandezza del chip, **da 80 a 1600 circuiti**.



Circuito integrato monolitico (9 transistori). Dimensioni circa 0,6 x 0,6 mm. ▶



Fettina di Silicio con 270 circuiti integrati. ▶

Vantaggi dell'integrazione

Bassi costi di produzione per elevati numeri di pezzi.
Alta affidabilità.
Alta stabilità termica.
Poco spazio occupato e basso consumo di potenza.
Alta complessità dei sistemi raggiungibile in modo economico.
Breve tempo di sviluppo per i circuiti elettronici.
Permette l'alimentazione a batterie anche per apparecchi di notevole complessità.

Svantaggi dell'integrazione

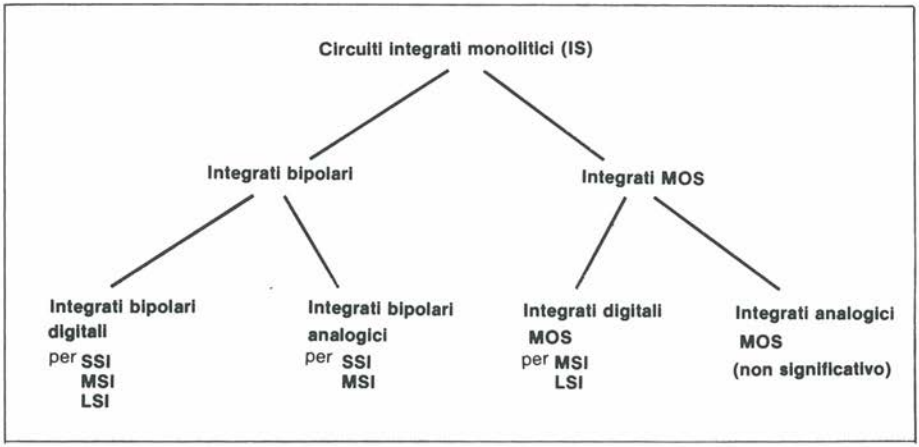
Potenza di uscita limitata. Le induttanze non si possono integrare. I circuiti integrati non sono modificabili da parte dell'utilizzatore. Alto dispendio di mezzi per lo sviluppo da parte del produttore.

Tre stadi di integrazione:

SSI (Small Scale Integration = Integrazione a piccola scala)	< 50	transistori per elemento.
MSI (Medium Scale Integration = Integrazione a media scala)	50-500	
LSI (Large Scale Integration = Integrazione a grande scala)	> 500	

La definizione dei gradi di integrazione non è unificata.

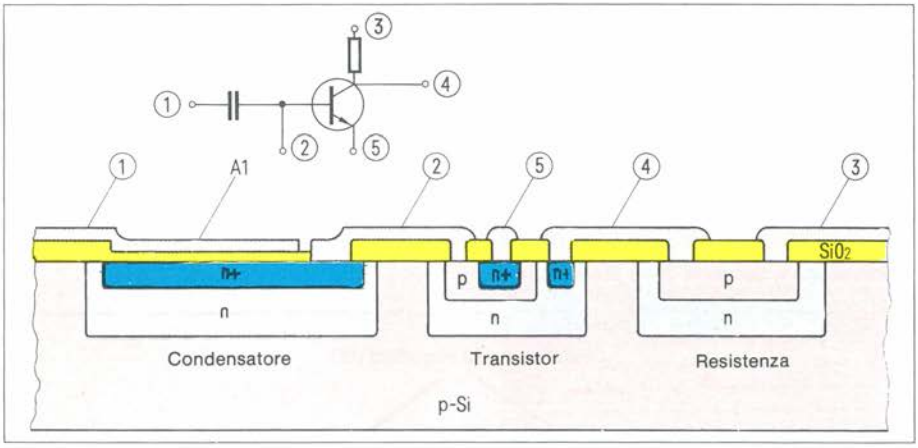
Suddivisione a seconda delle tecnologie.



CIRCUITI INTEGRATI BIPOLARI

Sono dei circuiti monolitici analogici o digitali in tecnica planare al Silicio, con transistori bipolari, diodi, resistenze, condensatori e piste conduttrici.

Esempio di un circuito integrato con transistor, condensatore e resistenza.

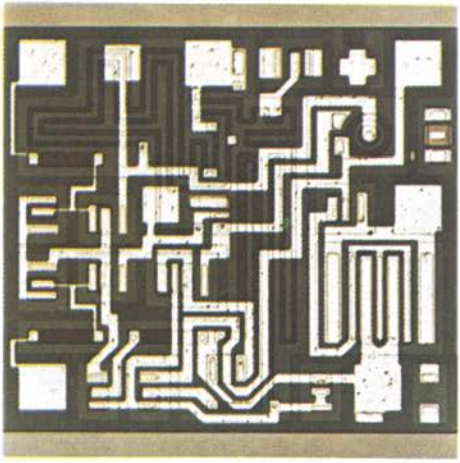


Schema e sezione.

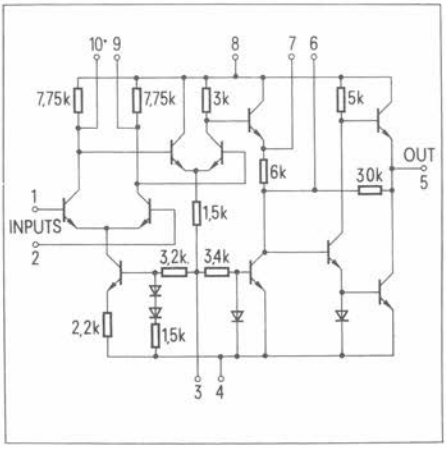
CIRCUITI INTEGRATI BIPOLARI, ANALOGICI

Si tratta di circuiti monolitici destinati all'amplificazione lineare ed al tattamento di segnali elettrici.

Esempio: Amplificatore operazionale.



▲
Microfotografia del chip.



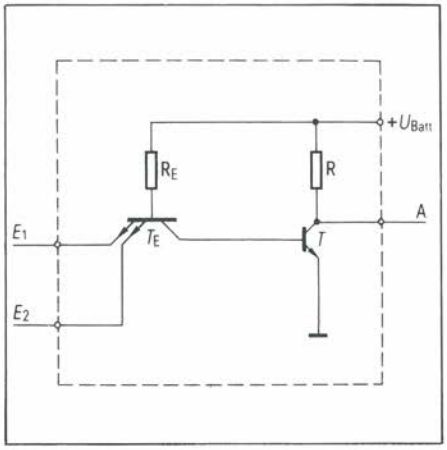
▲
Schema elettrico.

Applicazioni: Circuiti standard ed a specifica del cliente per il settore industriale e per quello dell'intrattenimento, con elevata **stabilità termica** ed elevata **larghezza di banda**.

CIRCUITI INTEGRATI BIPOLARI, DIGITALI

Si tratta di circuiti monolitici destinati al trattamento logico di segnali digitali, ossia contraddistinti da due stati elettrici.

TTL (Transistor-Transistor-Logic)
La più diffusa famiglia di componenti digitali con il minimo prezzo unitario e la massima versatilità.



Porta NAND TTL (Schema base semplificato)

Proprietà

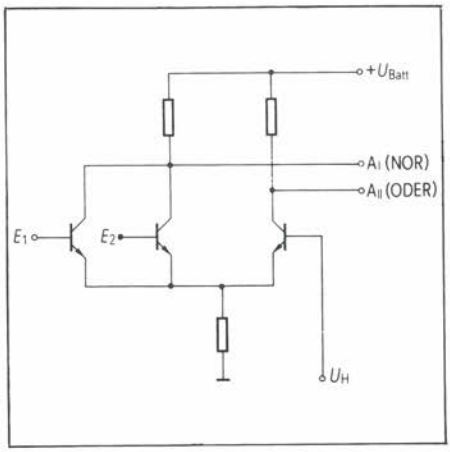
Il collegamento logico avviene mediante transistori poli-emettitore. Alta velocità operativa (tempo di salita tipico del segnale 10 ns per stadio). Grado di integrazione SSI/MSI. Bassa immunità ai disturbi (< 1 V). Alta potenza di perdita (10 mW/stadio).

Esecuzioni particolari

"TTL a bassa potenza" caratterizzati da basse perdite (1 mW/stadio).
"TTL Schottky" per velocità operativa maggiorata (3 ns/stadio).

ECL (Emitter Coupled Logic).

Famiglia di componenti digitali standard per una maggiore velocità operativa.



Porta logica ECL (E_1 ed E_2 ingressi, A_I ed A_{II} uscite)

LSL (Logica lenta ad elevata immunità ai disturbi).
Una logica a diodi - transistori munita di diodi Zener per ottenere elevate soglie di commutazione. Particolarmente adatta per l'impiego con segnali inquinati da alti livelli di disturbo, per esempio nell'impiantistica e nel comando di macchine operatrici.

Proprietà

Collegamento logico mediante transistori in parallelo accoppiati sull'emettitore. Tempo di risalita del segnale 1 ns/stadio per funzionamento dei transistori solo al di sotto del campo di saturazione. Grado di integrazione SSI/MSI.
Bassa immunità ai disturbi (<0,5 V).
Alta potenza assorbita (30 mW/stadio).
Esecuzioni speciali ECL con isolamento ad ossido per una maggiore velocità (0,5 ns/stadio).

DCTL (Direct Coupled Transistor Logic = Logica a transistori ad accoppiamento diretto)

RTL (Resistor Transistor Logic = Logica a resistenze e transistori)

DTL (Diode - Transistor - Logic = Logica a diodi e transistori) sono tecniche di impiego decrescente.

INTEGRAZIONE A GRANDE SCALA

(LSI = Large Scale Integration)

Ampliamento della tecnologia d'integrazione, destinata alla produzione di circuiti digitali con densità di integrazione particolarmente elevata su di un unico cristallo di Silicio.

INTEGRAZIONE A GRANDE SCALA MONOLITICA

Viene effettuata su piastrine di Silicio dalla superficie di 5 - 30 mm^2. È caratterizzata da un'**alta complessità** circuitale (500 - 15000 elementi per chip) e da un'**alta affidabilità** (tasso di guasti raggiungibile: $0{,}15/10^6$ ore/chip) con un **basso consumo** (< 500 mW per chip) e **bassi costi di produzione** (< 5 lire per elemento).

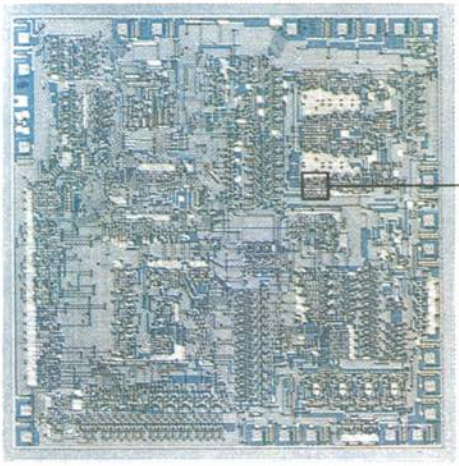
Effetti dell'integrazione a grande scala: cambiamenti strutturali nell'industria delle apparecchiature, caratterizzati da minori esigenze sul piano della finitura e da mutamenti nella struttura dei gruppi di lavoro. L'integrazione a grande scala permette in molte apparecchiature il passaggio dalla meccanica all'elettronica.

Sviluppi futuri

Densità di integrazione fino ad **un milione di componenti su chips da 1 cm^2** saranno ottenibili in futuro.

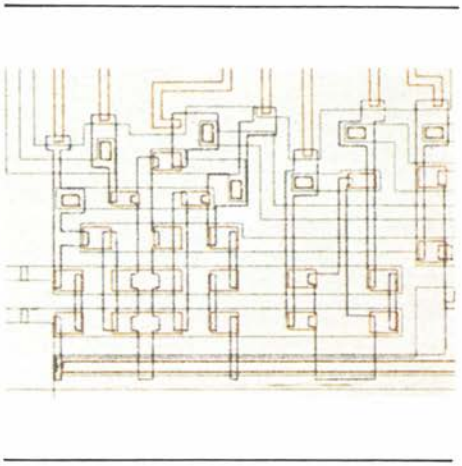
Tecnologie per l'integrazione a grande scala

Bipolare: TTL Schottky a bassa potenza, Logica integrata ad iniezione.
MOS: p-MOS, n-MOS, C-MOS, SOS, CCD.



▲

Esempio: chip di calcolatore p-MOS da 16 mm^2, 1800 transistori, potenza assorbita 500 mW.



▲

Sezione ingrandita del chip da calcolatore (1 mm corrisponde a 5 μm).

Applicazioni dei circuiti integrati a grande scala

Componenti standard come memorie a semiconduttore, calcolatori e microcalcolatori, come pure circuiti logici a specifica del cliente.

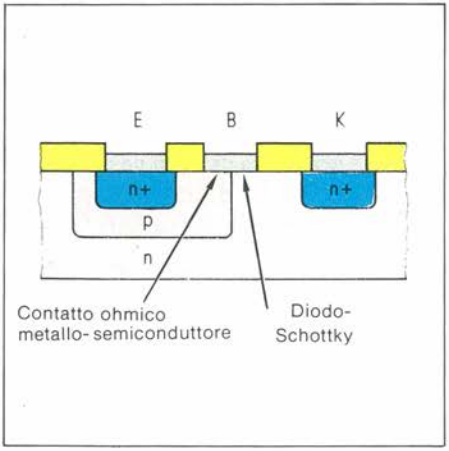
TECNICHE BIPOLARI PER L'INTEGRAZIONE A GRANDE SCALA

Ulteriori sviluppi della tecnica integrata bipolare, destinati alle superiori densità di integrazione ed al minore assorbimento di potenza.

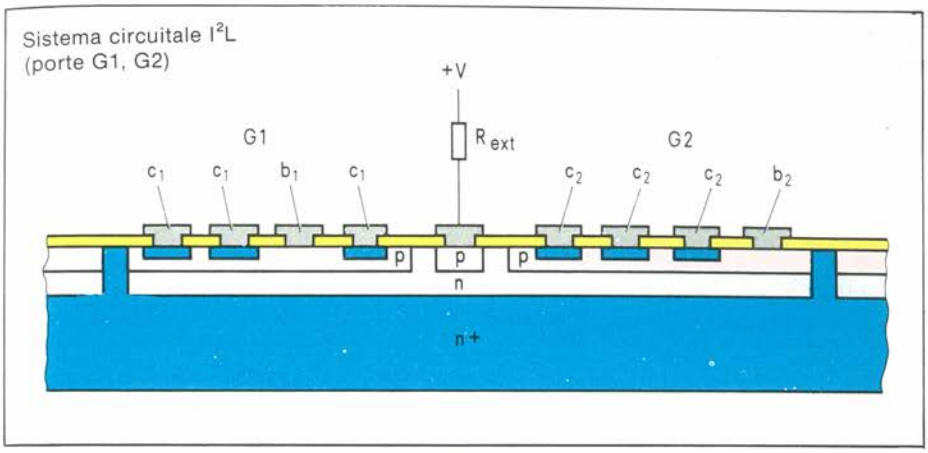
TTL Schottky a bassa potenza (LS-TTL)

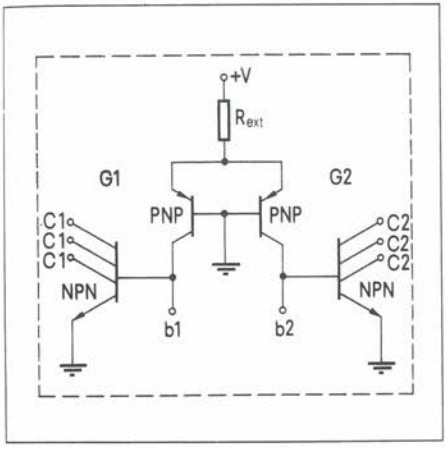
Limitazione della corrente di saturazione dei transistori con l'uso dei diodi Schottky in parallelo alle giunzioni pn E-B. Ne consegue un aumento della velocità di esercizio (come i TTL standard).
Diminuzione della grandezza delle strutture grazie al miglioramento delle tecniche di mascheratura e dell'isolamento ad ossido.
Minor assorbimento di potenza (2,5 mW/stadio) dovuto alle alte resistenze ottenute con l'impianto ionico.

I^2L (Integrated Injection Logic) Sistema destinato alle **maggiori densità di integrazione** (250 - 400 porte logiche per mm^2) e ad **un'alta velocità operativa** (25 - 250 ns/stadio); il sistema è caratterizzato da coppie di transistori complementari (npn/pnp) con il transistor npn provvisto di collettori multipli. Minimo prodotto velocità - potenza (1 picojoule/stadio).
Potenza assorbita molto ridotta (1 -10 μW/stadio).
Inoltre: Si può usare in combinazione monolitica con altre tecnologie (MOS, TTL). Esiste anche la possibilità di ottenere funzioni analogiche.



◀ Transistor con diodo Schottky.

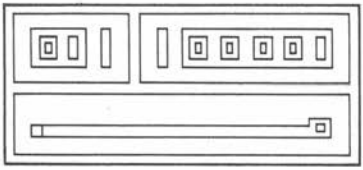




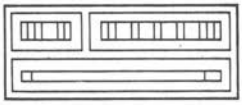
▲

Sistemazione circuitale I²L
(porte G1-G2)
Due strutture di porte I²L (G1, G2): schema elettrico.

Confronto dimensionale
per porte logiche a 4 ingressi



Standard TTL
(superf. 34200 μ^2)



Piccola potenza
TTL Schottky
(Superf. 12800 μ^2)

I²L
(Superf. 3000 μ^2)

TECNICHE MOS PER L'INTEGRAZIONE A GRANDE SCALA

Le tecniche MOS formano la base più importante per l'integrazione a grande scala dei circuiti logici digitali.

Varianti del sistema MOS per ottenere diverse proprietà elettriche dei circuiti MOS:
p-MOS con gate in alluminio (processo p-MOS standard)
p-MOS con gate in Silicio
p-MOS con transistori a svuotamento ed a riempimento
n-MOS con gate in Alluminio
n-MOS con gate in Silicio
C-MOS con transistori complementari a canale p ed a canale n.
In corso di sviluppo: **SOS** (Silicon On Sapphire = Silicio su zaffiro); **CCD** (Charge Coupled Devices = Dispositivi ad accoppiamento di carica).

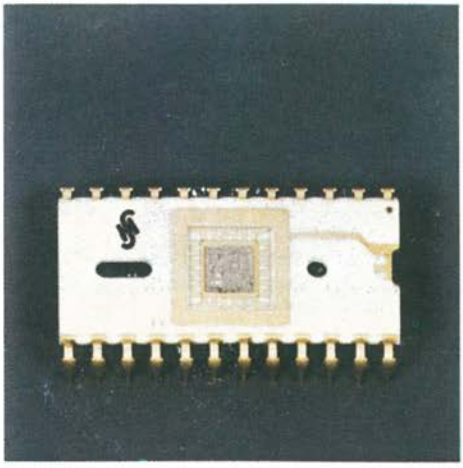
Tendenze di sviluppo
Strutture di minori dimensioni (con l'uso, per esempio, della litografia a fascio elettronico od a raggi X). Aumento delle velocità operativa, diminuzione della potenza assorbita; compatibilità con circuiti prodotti con altre teconologie (in particolare TTL).

Applicazioni
Circuiti integrati MSI ed LSI secondo specifiche del cliente, piccole macchine da calcolo, circuiti logici, memorie per dati (RAM, ROM, registri a scorrimento).

Confronto tra le tecniche MOS e le tecniche bipolari già presentate.

Vantaggi
Alta densità di integrazione, bassa potenza assorbita, produzione semplificata, bassi costi di produzione.

Svantaggi
Velocità operativa limitata; bassa potenza d'uscita; inadatte per funzioni analogiche.

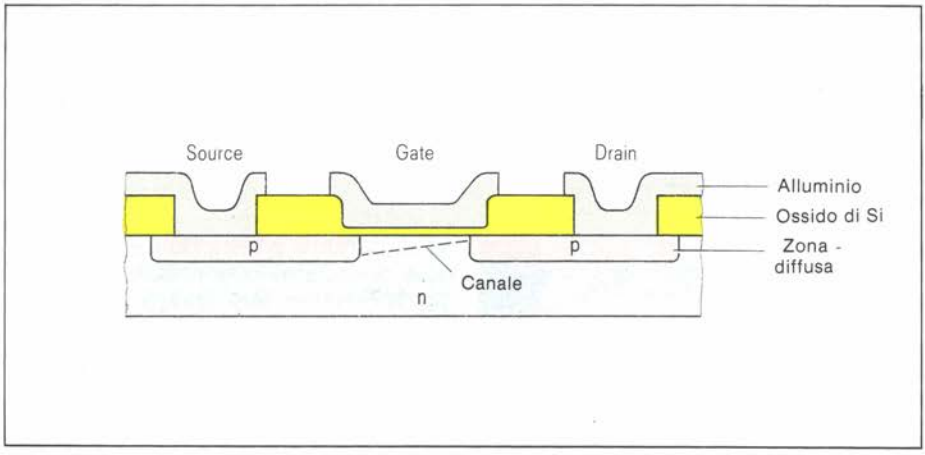


▲
Componente **MOS-LSI** in contenitore ceramico a 24 piedini.
Altre presentazioni normali: contenitori in plastica fino a 28 piedini, contenitori in ceramica fino a 40 piedini.

Tecnologia MNOS per memorie di sola lettura con programmazione variabile elettricamente (PROM). Si impiega uno strato di nitruro di Silicio sovrapposto ad uno strato di ossido reso corrispondentemente più sottile, per la funzione di gate. Nella programmazione vengono immesse delle cariche elettriche nella superficie di separazione nitruro - ossido del transistor indirizzato, in modo che questo passa in conduzione permanente. Si fa uso di impulsi di tensione.
Le cariche elettriche possono essere nuovamente tolte mediante impulsi a polarità invertita.

p-MOS CON GATE IN ALLUMINIO

La tecnica p-MOS costituisce il procedimento MOS originario, dal quale sono state ricavate le tecniche MOS migliorate.
E transistori p-MOS possiedono un canale a a conduzione p.



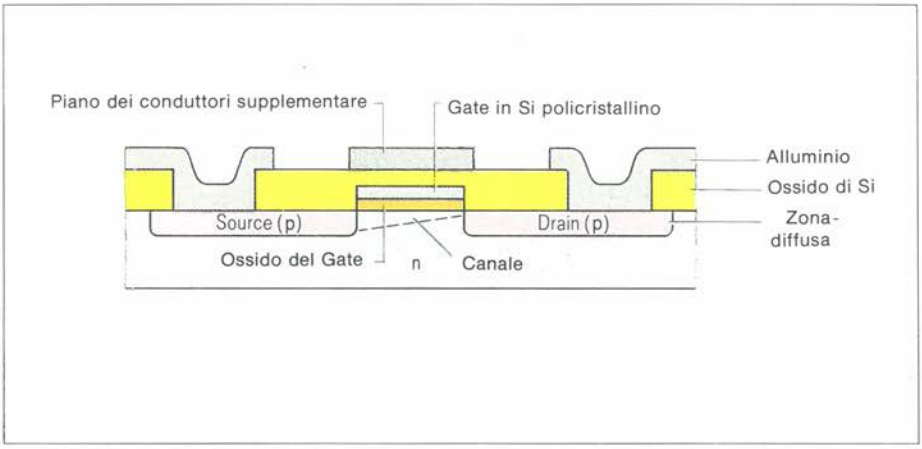
p-MOS con gate in Alluminio (processo p-MOS standard)
Si tratta del processo MOS originale e più diffuso (circa il modo di funzionamento del transistor vedi il capitolo relativo).
Le tensioni di gate e di drain devono essere piuttosto alte ("tecnica ad alta tensione"). In prevalenza del tipo a riempimento.

Vantaggi
È il processo MOS più semplice, con i minori costi di produzione e la massima sicurezza contro i disturbi.

Svantaggi
Ha bisogno di due tensioni di alimentazione piuttosto alte (-27 V e -12 V). Bassa velocità operativa (100 ns/stadio).
Potenza assorbita relativamente alta (0,5 mW/porta). È laborioso l'accoppiamento con i TTL.

Applicazioni
Circuiti MSI ed LSI a specifiche del cliente.

p-MOS CON GATE IN SILICIO



L'elettrodo di gate ed i relativi collegamenti sono fatti di Silicio policristallino conduttore. Uno strato di ossido di Silicio disposto sopra a questo piano di collegamenti forma un altro piano sul quale disporre altri collegamenti.
In massima parte del tipo a riempimento.

Vantaggi*
Alta densità di integrazione (fattore 1,3), alta velocità di funzionamento (70 ns/stadio), bassa potenza assorbita (fattore 0,7).

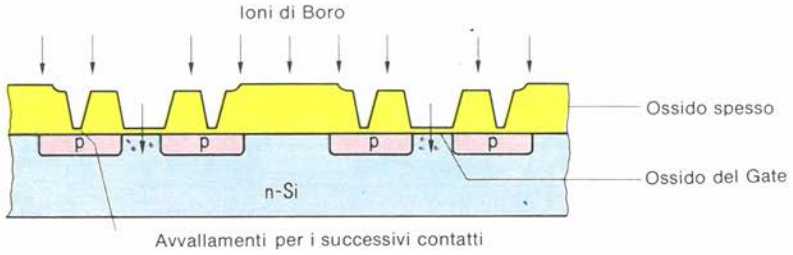
Svantaggi*
Processo di fabbricazione complicato, bassa immunità ai rumori.

Applicazioni: memorie - dati.

* In confronto ai p-MOS standard

p-MOS CON TRANSISTORI A RIEMPIMENTO ED A SVUOTAMENTO

Proprietà elettriche migliorate abbassando la tensione di soglia e produzione di transistori a svuotamento mediante impianto ionico.

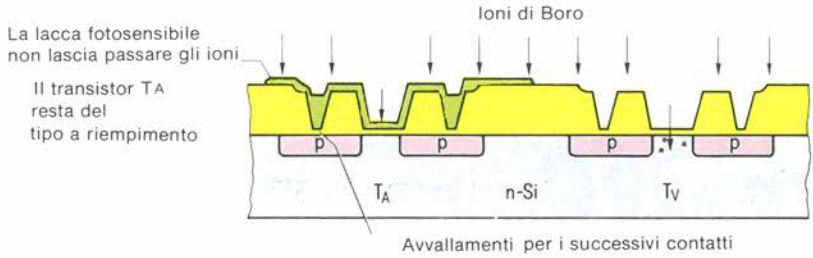


1. Impianto: Abbassamento della tensione di soglia

L'**impianto ionico** avviene in due fasi:

1° - **abbassamento della tensione di soglia**: per tutti i transistori (di norma da — 4 V a — 1,5 V).
Dopo il completamento dei transistori a canale p secondo la tecnica standard p-MOS, vengono impiantati nelle zone dei canali dei transistori, degli ioni accettori (ioni di Boro). Allo scopo la mascheratura avviene grazie allo spessore dell'ossido. Gli ioni di Boro non possono attraversare lo spessore dell'ossido, ma possono passare attraverso lo strato di ossido più sottile che riveste i gate dei transistori.

2° - **Produzione dei transistori a svuotamento** (T_V) con una successiva operazione di impianto ionico.
Conversione di una parte dei transistori dal tipo a riempimento al tipo a svuotamento. L'impianto ionico avviene solo al di sotto dell'ossido di gate non laccato. Il transistor T_V, viene così drogato una seconda volta, e convertito nel tipo a svuotamento.
I transistori a svuotamento formano per lo più gli elementi di potenza nei singoli stadi del circuito (tecnica "carico di svuotamento").



2. Impianto: Produzione dei transistori a svuotamento

Vantaggi*

Bassa potenza assorbita (fattore 0,2); maggior velocità di funzionamento (50 ns/stadio);

Maggior densità di integrazione (fattore 1,3); compatibilità TTL; tensione di alimentazione bassa e di valore non critico.

Svantaggio*

Maggior numero di fasi di fabbricazione.

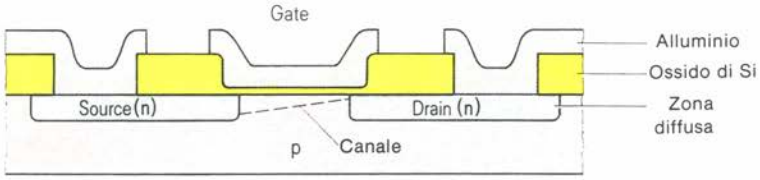
Applicazioni

Circuiti logici standard ed a specifica del cliente, memorie, microprocessori.

* In confronto ai tipi standard p-MOS.

n-MOS CON GATE IN ALLUMINIO

La tecnica n-MOS costituisce un miglioramento nella tecnologia MOS, e dispone di un canale a conduzione n atto ad ottenere tensioni di soglia inferiori e maggiori velocità di commutazione.



N-MOS con gate in Alluminio.

Deriva, come nel processo p-MOS standard, da

Un substrato drogato p con zone di diffusione drogate n.

Grazie all'elevata mobilità degli elettroni rispetto alle lacune nel cristallo di Silicio (fattore 3) si ottiene con l'n-MOS una velocità di commutazione corrispondentemente maggiore rispetto al tipo p-MOS.
In prevalenza del tipo a svuotamento.

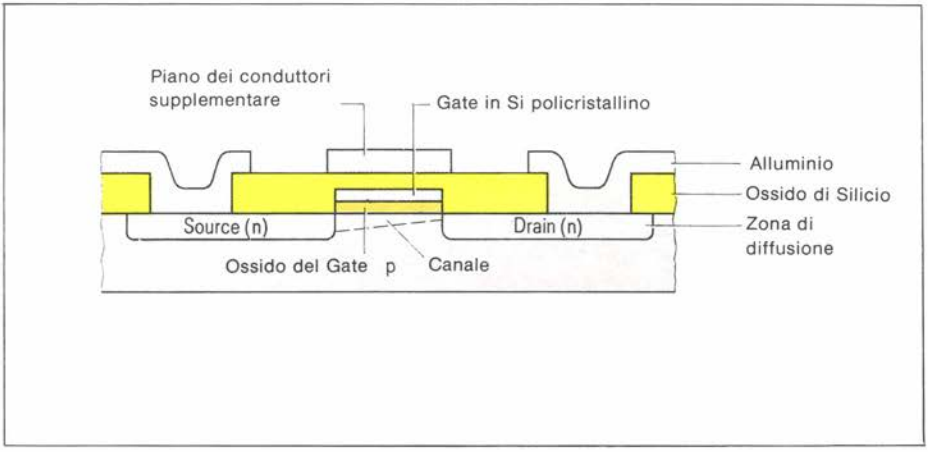
Vantaggi
Maggior velocità di funzionamento, (30 ns/stadio);
maggior densità di integrazione (fattore 1,3*); necessita una sola alimentazione, (5 V).
Bassa potenza assorbita (fattore 0,2*);
Completamente compatibile con il sistema TTL.

Svantaggio
Sistema di fabbricazione piuttosto critico.

Applicazioni
componenti standard ad alta velocità (memorie, calcolatori).

* in confronto al sistema p-MOS standard.

n-MOS CON GATE AL SILICIO



n-MOS con gate al silicio

Come nei p-MOS con gate in Silicio deriva sempre da:
un substrato drogato p con zone di diffusione drogate n.
In prevalenza del tipo a svuotamento.

Vantaggi

Altissima velocità di funzionamento (20 ns/stadio) Elevatissima densità di integrazione (fattore 1,5*).
Unica tensione di alimentazione (5 V).
Bassa potenza assorbita (fattore 0,2*).
Completamente compatibile con il TTL.

Svantaggio

Sistema di fabbricazione piuttosto critico.

Applicazioni

Componenti standard ad alta velocità (memorie, calcolatori).

* In confronto al sistema p-MOS standard.

C-MOS
(tecnica MOS complementare).

I circuiti C-MOS contengono transistori a canale p ed a canale n.

Tecnica MOS complementare (C-MOS)

In un substrato di Silicio drogato n vengono diffuse:
le zone a conduzione p destinate al source ed al drain dei transistori a canale p, come pure:
le vaschette a conduzione p destinate ad accogliere i transistori a canale n.

Un secondo processo di diffusione genera, nelle vaschette p, le zone di source e di drain a conduzione n destinate ai transistori a canale n.
Bisogna inoltre prevedere nel circuito delle zone isolanti atte a prevenire le correnti di fuga.

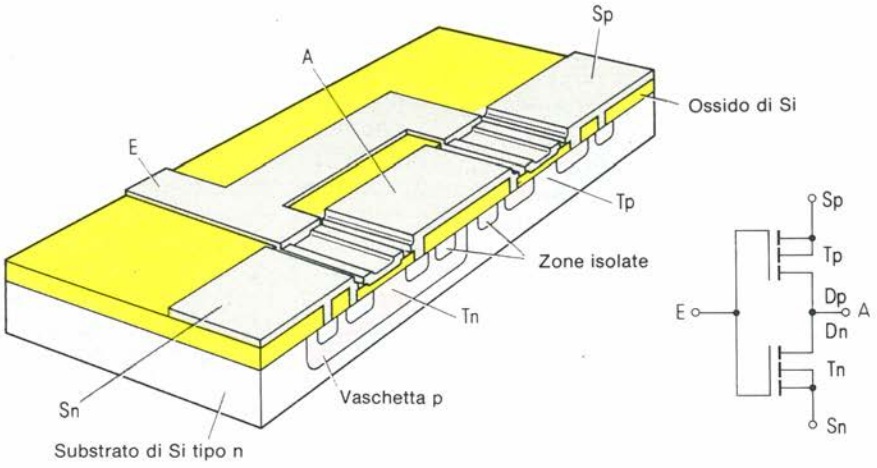
Dato che negli stadi complementari uno o l'altro dei due transistori (T_p oppure T_n) è interdetto, non può mai passare corrente dall'alimentazione al substrato.

La potenza assorbita in regime statico dai circuiti C-MOS è quindi eccezionalmente ridotta.
Con l'aumento della frequenza, la potenza assorbita cresce a causa delle correnti di trasferimento dovute alle capacità parassite.

Vantaggi
Potenza di perdita molto piccola (0,01 mW/stadio ad 1 kHz);
Elevata velocità di lavoro (20 ns/stadio);
Alta immunità ai rumori;
Compatibilità TTL;
Tensione di alimentazione non critica (3 - 16 V).

Svantaggi
Processo di fabbricazione critico;
Bassa densità di integrazione (50% rispetto ai p-MOS).

Applicazioni
Componenti LSI per calcolatori ed orologi. Circuiti standard MSI. Apparecchiature alimentate a batteria.



Costruzione e schema di un invertitore C-MOS

TECNICA ESFI

Si tratta di una tecnica nuova per ottenere circuiti MOS complementari che impiega come substrato un cristallo non conduttore rivestito di Silicio, al posto della consueta rondella di Silicio monocristallo.

Con la tecnica ESFI (**E**pitaxial **S**ilicon **F**ilm on **I**solator = pellicola di silicio epitassiale su dielettrico), i transistori vengono ricavati da una sottile pellicola di Silicio depositata su substrato non conduttore. Rispetto ai tradizionali componenti in tecnica C-MOS questi possiedono una capacità parassita fortemente ridotta ed un migliore isolamento.
A seguito di quanto detto, i transistori mostrano i seguenti **vantaggi**.

- Tempi di commutazione molto brevi (1 - 5 ns/stadio).
- Potenze di perdita in regime dinamico molto basse (50 - 200 μW/stadio).

Ulteriori vantaggi rispetto ai C-MOS sono:

- Maggiore densità di integrazione (circa 20%).
- Minor numero di fasi di fabbricazione.
- Alta immunità ai disturbi irradiati.

I più importanti **svantaggi** rispetto ai C-MOS sono:

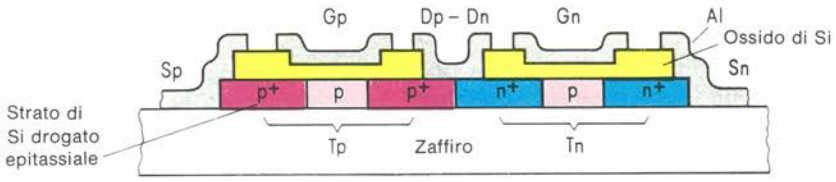
- Costo molto maggiore del substrato (fattore > 4), per cui sino a questo momento non c'è ancora grande offerta di questi componenti sul mercato.
- Processo produttivo critico, specialmente per quanto riguarda le corrente di fuga drain-source.
- I materiali che formano il substrato presentano una maggior difficoltà di lavorazione rispetto al Silicio.

Con una variante più progredita della tecnica ESFI (**ESFION**) si ottiene, per mezzo dell'impianto ionico, un autocentraggio dei gate, e quindi un'ulteriore diminuzione della capacità di sovrapposizione del gate.
Tra i tipi di substrati impiegati oggigiorno, ossia lo zaffiro (ossido di Alluminio) e lo spinello (ossido misto di Alluminio e Magnesio), viene adottato di preferenza lo zaffiro a causa di vantaggi di costo (Tecnica SOS. SOS = Silicon on Sapphire = Silicio su zaffiro).

SOS (SILICIO SU ZAFFIRO)

Si tratta di una tecnica ESFI, che usa come substrato una lastrina di zaffiro rivestita di Silicio.

Esempio:
Invertitore SOS complementare con gate di alluminio (Costruzione)



Tp = Transistor a canale p
Tn = Transistor a canale n

Sp, Sn = Source
Dp, Dn = Drain

L'isolamento vicendevole delle singole strutture avviene mediante attacchi chimici selettivi degli strati di Silicio che servono da separazione. In questo modo il circuito apparirà sotto forma di isole disposte sul substrato.
T_p e T_n lavorano in controfase come avviene nei C-MOS.

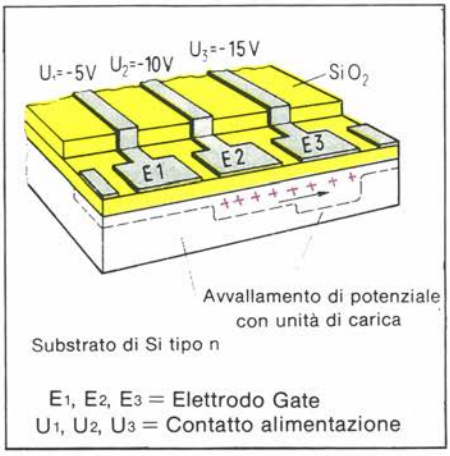
Il transistor a canale p è del tipo a svuotamento (p^+ - p - p^+).
Esso diventa non conduttore quando sia applicata una tensione positiva al gate.
Il transistor a canale n è del tipo a riempimento e diviene conduttore quando venga applicata una tensione positiva all'elettrodo di gate.

Applicazioni:
Circuiti logici per calcolatori
Memorie
Microprocessori
Strumenti di misura
Apparecchiature alimentate a batteria.

CIRCUITI CON ACCOPPIAMENTO DI CARICA (CCD)

Si tratta di circuiti a semiconduttore analoghi a quelli in tecnologia MOS, che operano mediante il trasporto passo - passo di cariche elettriche aventi base al di sotto della superficie del cristallo.

Sulla superficie di un substrato di Silicio drogato n viene disposto un gran numero di elettrodi in Alluminio (gates) disposti in fila molto vicini tra loro, a forma di sbarrette ed isolati dal cristallo (vedi figura). I transistori si trovano soltanto all'ingresso ed all'uscita del segnale da una catena di elettrodi.
I segnali dei dati al transistor d'ingresso della catena provocano le cariche iniziali all'inizio della catena corrispondente, nella zona che sta al di sotto del primo elettrodo di gate.
Le tensioni di cadenza, che si susseguono nelle appropriate sequenze temporali sugli elettrodi di ciascuna catena, spostano queste cariche di un posto sotto alla superficie, ad ogni impulso di sincronismo, in direzione del termine della catena. Questo processo corrisponde all'avanzamento dell'informazione in un registro a scorrimento.
Le perdite di carica che avvengono ad ogni spostamento del segnale, vengono compensate mediante stadi di amplificatori a MOS disposti ad intervalli lungo la catena.
Al di sotto dell'elettrodo che possiede la maggior tensione negativa si trova il più profondo avvallamento di potenziale per le cariche positive



▲ Disposizione di principio di un circuito CCD con clock a tre fasi.

(che trasportano l'informazione). In questo avvallamento cadono le cariche, provenienti da un avvallamento adiacente meno profondo.
L'impulso di clock provoca l'avanzamento di un passo della valle di potenziale e quindi anche della carica.

Applicazioni

Sostituzione delle memorie a dischi a testina fissa o delle memorie a tamburo. Filtri digitali, memorie d'immagine per telecamere.

Sviluppi futuri

In sostituzione dei sistemi a tre fasi (sistemazione laboriosa dei collegamenti, distanza tra gli elettrodi estremamente ridotta), si stanno sviluppando di preferenza dei sistemi a due fasi ottenuti mediante l'impianto ionico. In questi risulta maggiore l'efficienza del trasferimento delle cariche, e la distanza tra gli elettrodi risulta meno critica.
Si ottengono delle memorie CCD di tipo non volatile memorizzando ulteriormente le cariche in condensatori a strato di nitruro (Tecnica MNOS).
Oltre alle catene CCD lineari, possono venir prodotte anche delle matrici X - Y (superfici di memoria).
Le cariche possono anche essere prodotte mediante luce incidente sulla superficie del cristallo, ed i corrispondenti tipi speciali di circuiti CCD ad estensione superficiale, possono venir impiegati come memorie d'immagine.

Vantaggi

Densità di integrazione molto elevata (2 kbit/mm^2); prezzo per bit molto inferiori a quello degli altri tipi di memoria a semiconduttore (circa 1,5 lire per bit). Memorizzazione di dati analogici; alta velocità operativa.

Svantaggi

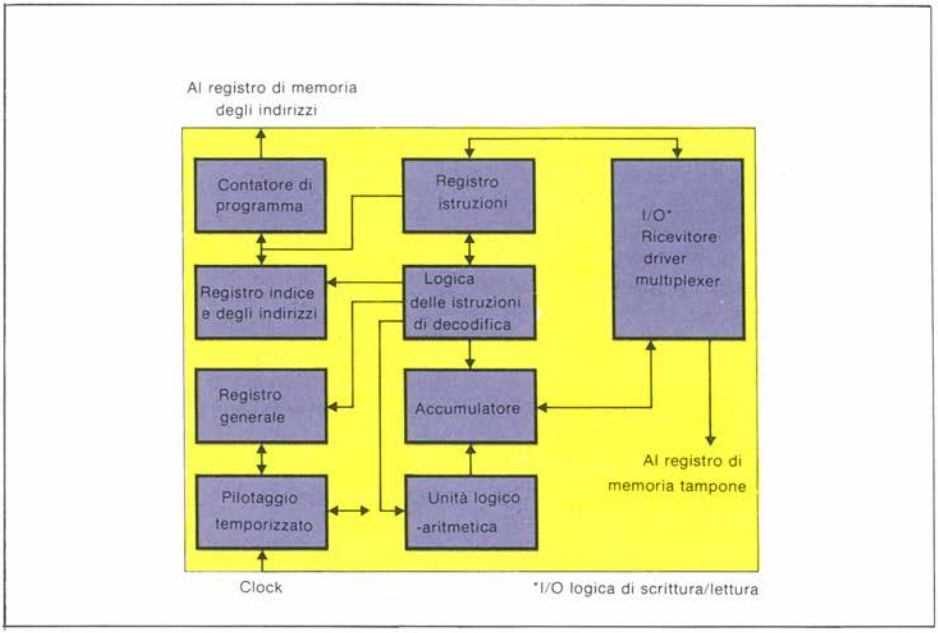
Funzionamento esclusivamente dinamico, incompatibili con il sistema TTL.

MICROPROCESSORI

Si tratta di circuiti standard integrati monolitici, che formano l'unità centrale di calcolo e di pilotaggio dei calcolatori e dei microcalcolatori.

I microprocessori corrispondono alle unità centrali di calcolo (CPU) dei grandi calcolatori.
Consistono prevalentemente di un componente LSI in tecnologia MOS.
Con il medesimo microprocessore si possono assemblare diversi circuiti di calcolatore, in quanto per questi circuiti sono previsti sul chip del microprocessore identici elementi funzionali di pilotaggio e di calcolo.
I dati vengono convenientemente elaborati nel microprocessore sotto forma di parole, e precisamente in gruppi di parecchi bit contemporaneamente; (lunghezze delle parole di 4, 8, 12 o 16 bit).
I micorprocessori bipolari hanno acquistato un significato grazie alla loro elevata velocità di lavoro, specialmente sotto forma di processori a parola corta (da 2 a 4 bit); per elaborare parole di maggior lunghezza, si possono unire tra loro in forma modulare (struttura "bit-slice").

L'avvento del microprocessore ha reso possibile il microcalcolatore.
Funzioni fondamentali del microprocessore: ricevere, interpretare ed eseguire istruzioni (indicazioni funzionali, indirizzi e dati) provenienti da altri elementi del microcalcolatore o da apparecchiature di comando esterne.
Nella maggior parte dei microprocessori sono stabilmente programmati allo scopo alcuni cicli fissi di operazioni.
I microprocessori che si trovano sul mercato differiscono tra loro specialmente per la struttura interna, per le prestazioni e per la programmazione (il "software").



▲

Le più importanti unità funzionali di un tipico microprocessore.
Tutte queste unità funzionali sono di solito integrate su di un unico chip.

MICROCALCOLATORI

Sono piccoli circuiti
di calcolo programmabili
formati da componenti LSI
uniti ad un microprocessore.

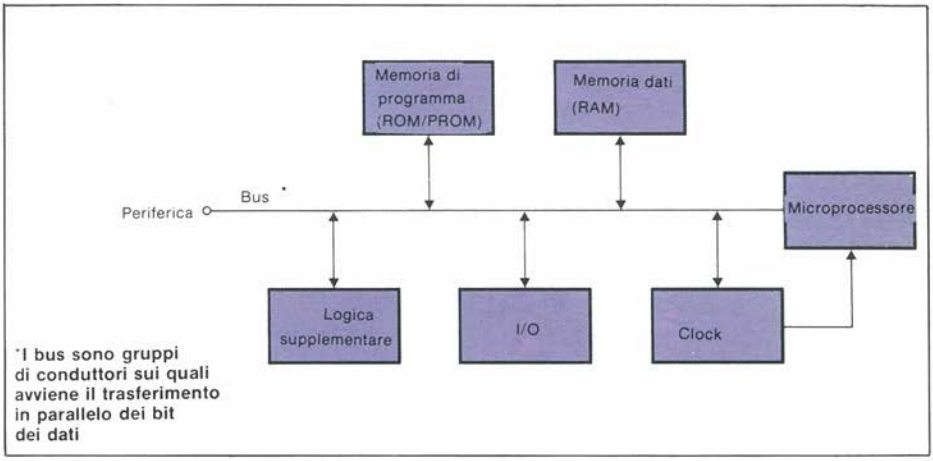
I microcalcolatori possono svolgere le funzioni di circuiti LSI dedicati ad uno specifico scopo, oppure quelle di calcolatori più grandi (minicalcolatori).
Nel microcalcolatore:
- vengono eseguite le funzioni di pilotaggio ed aritmetiche da parte del **microprocessore**.
- si trova il programma particolare destinato all'applicazione del sistema, predisposto in una memoria a semiconduttore separata e programmabile (ROM oppure PROM).
La memoria sostituisce buona parte dei circuiti logici convenzionali a porte.

Vantaggi

In un componente LSI specificamente destinato alla funzione da svolgere, si trovano riunite in un unico chip la parte aritmetica e quella riguardante la gestione del programma, in modo stabile ed immutabile.
Nei microcalcolatori è possibile costruire il circuito usando componenti standard, e questo avviene tenendo separate la parte aritmetica (microprocessore) dalla parte che gestisce il programma (memoria di programma); è anche possibile programmare la memoria di programma per speciali funzioni.
Si possono trovare le soluzioni più economiche in una vasta estensione di applicazioni.

Applicazioni

Pilotaggio di macchine utensili, gestione magazzini, gestione schedari (polizia, banche), regolazione del traffico, trattamento dati, automatizzazione di strumenti di misura, funzioni generiche di piccolo calcolatore.



Esempio di un microcalcolatore

Ognuno degli elementi di calcolatore nominati in precedenza si compone di solito di uno o più circuiti integrati.
Ci sono però anche microcalcolatori nei quali tutte le suddette unità sono integrate su di un unico chip (microcalcolatori monolitici).

GLOSSARIO ALFABETICO

A . . . . . **Pagina**

Accensione (SCR) 19
Accessori 11, 14
Accoppiamento, elemento di 25
Analogici, circuiti 45
Avvallamento di potenziale 64

B

Base 23, 27
Boro 10, 13, 29
Bus di microcalcolatori 69

C

Campo, intensità di 18, 20
Canale 34, 36
Canale n, MOS - 37, 38
Canale P, MOS a 36
Capacità (della giunzione pn) 19
Capacità variabile, diodo a 19
Carica, portatori di 9, 11, 17, 20
Carica, doppia di portatori di 16
Carica spaziale, zona di 14, 15, 17, 19, 20, 22
CCD (charge coupled devices) 64
Circuiti integrati bipolari 44, 45, 46
Circuiti ad accoppiamento di carica 64
Collettore 27
Collettore, corrente di 27
Commutazione, tempo di 16
Commutazione, ritardo di 16
Complementare, tecnica MOS 60
Complementari, coppia di transistori 50, 60
Conducibilità 8

Conduzione, corrente in 15, 16
Conduzione, direzione di 15, 16
Conduzione, tensione di 24
Conduzione p, semiconduttori a 11, 13, 14
Corrente di emettitore 23, 27
Corrente di mantenimento (SCR) 33
Corrente in conduzione 14, 16
CMOS 60
Cristallo, amplificatore a 26

D

DCTL 47
Diac 33
Diffusione 13
Diffusione, tensione di 14, 16
Digitali, circuiti 43, 46, 52
Diodi 16, 18, 20, 22, 24
Diodi, curva caratteristica dei 16, 18, 20
Direct coupled transistor logic 47
Dislocazioni (del reticolo cristallino) 16
Donatori 11, 14
Drogaggio (n, n_+, p, p_+) 11, 12
Drogaggio, materiale di 12, 24
Drogaggio, tecniche di 12
Drain 34, 36, 54
DTL 47

E

ECL 47
Effetto di campo 34, 36
Effetto di campo, transistori ad 34, 36
Elettroni 9, 11, 14
Emettitore 23, 27
Emitter Coupled logic 47
Energia luminosa 23
Epitassiali 29
ESFI 62

F

FET 34, 36
Film, circuiti a 38
Fotodiodo 22, 25

Fotoelemento 23
Fotoelettrica, tensione 23
Fotoelettrica, corrente 22, 23
Fotolitografia 29
Fototransistor 23, 25
Fotoricevitore 22, 25

G

Gallio, arseniuro di 21, 24
Gallio, fosfuro di 24
Gate 32, 36
Gate ossidato 36, 54, 55
Germanio 8, 10, 12
Giunzione 14, 19
Giunzione, transistor Fet a 34
Gunn, elemento 21

I

Ibridi, circuiti 40
I^2L 50
Impatt, diodi - 20
Impianto ionico 13, 56, 57
Indio 10, 12
Integrated injection logic 50
Integratin circuiti 42
Integrazione a grande scala 48
Interdizione, corrente di 16, 18, 22, 27, 33
Interdizione, verso di 15, 16, 27

J

J FET, Junction FET 34

L

Lacune 11, 14, 26
Larghe scale integration 50
Lavoro di estrazione 19
LED 24
Lega 12
Lega, transistori a 12
Logica a diodi transistori 47

Logica lenta ad alta immunità ai disturbi 47
Lox poxer Schottky TTL 50
LSI 43, 48
LSL 47
Luminescente, diodo. 24, 31

M

Mesa transistor. 27
Microcalcolatore 68
Microonde, amplificatori per 20
Microonde, diodi a 20
Microprocessori 66, 68
MNOS 53
Monocristalli. 12
Monolitici, circuiti integrati. 42, 43, 48
MOS, tecnica ad alta tensione. 36
MOS, tecnica a bassa tensione. 36
MOS, transistori ad effetto di campo 36
MOS, tecniche (LSI). 52
MOS, tetrodo 36
MSI 43

N

Negativi, portatori di carica 11

O

Optoelettronici, elementi di accoppiamento. 25
Ossidazione 29

P

Periodico, sistema - degli elementi 10
PIN, diodi 21
p-i-n, raddrizzatori 17
Planare, tecnica - 28
Polisilicio, porta a - 55, 59
Pozzo 34
p-MOS. 54
pn, giunzione - 14, 19, 24, 27
PROM 68

R

Raddrizzatore 16, 19
Rendimento 23
Resistor transistor logic 47
Reticolo cristallino 12
Resistenza specifica 8
Ricombinazione 24
ROM 68
RTL 47

S

Schottky, diodo - 19
SCR 32
Semiconduttore 8, 9, 10
Semiconduttore, cristallo 9
Semiconduttore, drogato 10
Serigrafia 38
Silicio 10
Silicio su zaffiro 63
Silicio, ossido di - 28, 54
Silicon controller rectifier 32
Sintonia, diodi per - 19
Small scale integration 43
Software 66, 68
Soglia, tensione di 16, 37, 56
Solari, celle -. 23
Sorgente 34
SOS 63
Source 34, 36
Spinello 62
SSI 43
Svuotamento, transistor a 37, 56
Substrato 36, 38, 62

T

Tecnica a film sottile 39
Tecnica a film spesso 38
Tecnica MOS a gate di Silicio 37, 59
Tensione di rottura 18
Tiristor 32
Transistori a semplice diffusione 31
Transistori a svuotamento 37
Transistori a riempimento 37

Transistori a tripla diffusione 31
Transistori epibase 30
Transistor bipolare 26, 28
Transistor-transistor, logica a 46
Trappat, diodi - 20
Triac 33
Triodo a quattro strati 32
TTL 46
Tunnel, correnti di 20
Tunnel, diodo - 20

U

Urto, ionizzazione da 18
Unipolare, transistor 34

V

Valanga - tempo di percorso - diodi a 20
Valenza, elettroni di 9
Varactori, memoria a - 21

Z

Zaffiro 63
Zener, diodi - 18
Zener, effetto - 18
Zona i 17, 20, 21
Zone (domini) di campo elevato 21

ELENCO LIBRI JACKSON

n° costa	Titolo	Prezzo
2	Esper. col TTL 8080A vol. I	22.000
3	Esper. col TTL 8080A vol. II	22.000
4	Manuale del riparatore TV	23.000
5	Timer 555	10.000
6	SC/MP	11.000
7	Circuiti logici di memoria vol. I	22.000
8	Circuiti logici di memoria vol. II	22.000
9	Bugbook IIA	4.500
10	Bugbook III (in esaurimento)	19.000
11	La progettazione dei filtri attivi	17.000
12	La progettazione degli amplificatori operazionali	17.000
13	Nanobook Z80 Vol. I	17.000
14	Corso di elettronica fondamentale con esperimenti	17.000
15	Circuiti integrati digitali	8.000
16	Comprendere l'elettronica a stato solido	16.000
17	Audio HI-FI	7.000
18	Introduzione al Personal Computing	14.000
19	La progettazione dei circuiti PLL	16.000
20	Introduzione al microcomputer Vol. 0	16.000
21	Bugbook VII	17.000
22	Principi e tecniche elaborazione dati	17.000
23	Guida ai CMOS con esperimenti	17.000
24	Elementi di trasmissione dati	10.500
25	Tecniche d'interfacciamento dei microprocessori	25.000
26	Introduzione al microcomputer Vol. I	18.000
27	Nanobook Z80 Vol. III	20.000
28	DBUG	7.000
29	Microprocessori dai Chips ai sistemi	25.000
31	TEA 8080-8085	14.000
32	La programmazione dello Z8000	25.000
33	8080A/8085 programmazione in linguaggio Assembly	27.500
34	Programmazione dello Z80 e progettazione logica	21.500
35	Programmazione dell'8080 e progettazione logica	19.000

n° costa	Titolo	Prezzo
36	Z80 programmazione in linguaggio Assembly	34.000
37	Impariamo il Pascal	11.500
38	Elettronica integrata digitale	38.000
39	Introduzione al Basic	21.000
40	I tiristori 110 progetti pratici	9.000
41	Impariamo a programmare in Basic con PET/CBM	11.500
42	Pascal manuale e standard del linguaggio	11.500
43	Usare il microprocessore	17.000
44	Programmazione dello Z80	26.000
45	Interfacciamento microcomputer PPI	12.000
46	Microelettronica la nuova rivoluzione industriale	11.500
47	Gli amplificatori di Norton quadrupli	24.000
48	Applicazioni del 6502	15.500
49	Impariamo a programmare in Basic con VIC/CBM	12.500
50	Programmazione del 6502	25.000
51	Programmare in Assembler	10.000
52	Come programmare	12.000
53	Giochi con il 6502	19.500
54	Pico Computer-Guida in Assembler Z80	9.000
55	Programmare in Basic	8.000
56	Soluzione di problemi con Pascal	28.000
57	Manuale degli SCR	24.000
58	Programmi pratici in Basic	12.500
59	Programmare in Pascal	14.000
60	Il Basic e la gestione dei file Vol. I	11.000
61	Introduzione al Pascal	30.000
62	75 programmi in Basic per il vostro computer	12.000
63	Dal Fortran IV al Fortran 77	18.000
64	Telematica	19.000
65	Manuale pratico di registrazione multipista	10.000
66	Computer Grafica	29.000
67	66 Programmi per ZX81 e ZX80 con nuova ROM più Hardware	12.000
68	Giocare in Basic	20.000
69	Manuale pratico di progettazione elettronica	30.000
70	50 esercizi in Basic	13.000
71	Programmi di matematica e statistica	16.000
72	Impiego pratico dell'oscilloscopio	16.000
73	Apple II - Guida all'uso	26.000
74	Proibito! o come aver cura di un computer	14.000
75	La soppressione dei transitori di tensione	12.000
76	Interfacciamento dell'Apple	14.000

n° costa	Titolo	Prezzo
77	Microprocessori al servizio del management CAD/CAM e nuove tecnologie	20.000
510P	CP/M con MP/M	22.000
099A	Corso programmato di elettronica ed elettrotecnica	109.000
607H	Guida mondiale dei transistori	23.000
608H	Guida mondiale degli op/amp	17.000
609H	Guida mondiale dei JFET e MOS	11.500
100H	Dizionario di informatica	45.000
318B	Guida al Sinclair ZX81 ZX80 e nuova ROM	16.500
319D	Alla scoperta del TI 99/4A	16.000
318D	DAI manuale del microcomputer	9.000

L. 7.500 Cod. 141A ISBN88-7056-137-2

Questo breve, ma esauriente corso sui transistori e suoi derivati, tratto da un manuale della Siemens tedesca, nasce dalla constatazione che è esiguo il numero delle persone che ha una visione completa ed esatta della evoluzione subita dai semiconduttori, a partire dal loro capostipite il transistore, per arrivare al più recente microprocessore nel quale si sposano l'evoluzione circuitale con quella tecnologica che ha permesso una massiccia integrazione. Dopo la lettura di questo volumetto, riccamente illustrato con ben 60 disegni e fotografie a colori, parole come diodi Pin, diodi Tunnel, Mos-Fet, CMos, ecc, non metteranno più in imbarazzo il lettore che riuscirà a vedere con occhi meno stupiti e timorosi la moderna circuiteria a stato solido, da tempo definitivamente affermatasi nella progettazione degli apparati elettronici.